

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

THIAGO RODRIGO SCHOSSLER DE SOUZA

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-
AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE MANEJO**

Recife

2017

Thiago Rodrigo Schossler de Souza
Engenheiro Agrônomo

Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob sistemas de manejo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciências do Solo) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Ciências do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Co Orientadores: Prof. Dr. Fernando José Freire
Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

Recife
2017

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

Ficha catalográfica

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

S729a Souza, Thiago Rodrigo Schossler de
Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob
sistemas de manejo / Thiago Rodrigo Schossler de Souza. –
2017.
113 f. : il.

Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.
Coorientador: Fernando José Freire.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo,
Recife, BR-PE, 2017.
Inclui referências.

1. Gessagem 2. Densidade amostral 3. Geoestatística
4. Intervalo hídrico ótimo 5. Subsolação 6. Cana-de-açúcar
I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Freire, Fernando José,
coorient. III. Título

CDD 631.4

THIAGO RODRIGO SCHOSSLER DE SOUZA

Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob sistemas de manejo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Ciências do Solo, com área de concentração em Física, Manejo e Conservação do Solo e da Água.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2017

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Yuri Jacques Agra Bezerra da Silva
Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto
Estação Experimental de Cana-de-açúcar

Prof. Dr. Fernando José Freire
Universidade Federal Rural de Pernambuco

EPÍGRAFE

”A ciência é muito mais do que um corpo de conhecimento. É uma maneira de pensar. E isso é fundamental para o nosso sucesso. A ciência nos convida a aceitar os fatos, mesmo quando eles não estão de acordo com nossos preconceitos. Ela nos aconselha a levar hipóteses alternativas em nossas cabeças e ver quais são as que melhor correspondem aos fatos. Impõe-nos um equilíbrio perfeito entre a abertura sem obstáculos a novas ideias, por mais heréticas que sejam, e o mais rigoroso escrutínio cético de tudo – estabelecendo novas idéias e sabedoria.”

Carl Sagan.

*A minha família,
Vera, Thais, Tania e Gabriela*

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o incentivo, amor e carinho nos momentos mais difíceis. Em especial a minha mãe, que sempre acreditou no meu potencial e capacidade, pelo amor, incentivo e confiança e por todo conhecimento não-científico que tive, e por me dar suporte para vencer mais essa etapa;

Às minhas irmãs Thais, Tânia e Gabriela por todos os momentos felizes que tivemos e por sempre estarem comigo mesmo nos momentos mais difíceis;

Ao Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, pela amizade, orientação, dedicação preocupação e conversas durante a realização deste trabalho e pelo o exemplo de professor;

Ao Prof. Dr. Fernando José Freire, por toda contribuição na execução deste trabalho desde o planejamento, financiamento e contribuição científica na elaboração dos capítulos;

Aos Professores Yuri Jacques e Ênio Farias e ao Dr. Djalma por aceitar participar da banca e pelas sugestões e correções pontuais e construtivas que irão fornecer ao trabalho final;

Ao professor Dr. Manassés Mesquita por toda contribuição na montagem do sistema de irrigação;

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo/UFRPE: Fernando José Freire, Edivan Rodrigues de Souza, Clístenes Nascimento, Emídio Cantídio Almeida de Oliveira Filho e Mateus Rosas Ribeiro Filho pelos ensinamentos adquiridos nas disciplinas que cursei;

Ao grande amigo Bruno Mantovanelli pela ajuda nos trabalhos de campo, laboratório e escrita;

Aos amigos de curso Edivan Uchôa, Daniela, Vinícius, Abraão (Ciço), Carlos Vitor pelos momentos de descontração;

À Estação experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC) pelo apoio na realização da pesquisa e em especial ao Dr. Djalma e Evanílson e toda a equipe de funcionários que também contribuíram nos trabalhos de campo;

Ao laboratório de Física de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo apoio na realização das análises laboratoriais e a todos os colegas de laboratório: Kairon, Valério, Evanilson, Ana, Thaís, Marcos, Symone Falcão, Pedro, Jameson, Stefani, e Talmo pelo convívio e amizade;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;

À todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Meu muito Obrigado!

Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob sistemas de manejo

RESUMO GERAL

O conhecimento da distribuição espacial dos atributos físicos do solo, bem como as práticas de manejo do solo e da aplicação de gesso é importante para avaliar efeitos das operações agrícolas sobre a produtividade da cana-de-açúcar. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi indicar a melhor densidade amostral, determinar a variabilidade espacial, os efeitos do preparo do solo com gradagem + subsolagem e da gessagem nos atributos físicos em um Argissolo Amarelo distrocoeso, correlacionando com a produtividade da cana-de-açúcar. Para avaliar a variabilidade espacial e densidade amostral foi demarcada uma malha amostral em cultivo de primeiro ciclo da cana-de-açúcar, onde foram coletadas 32 amostras equidistantes, espaçadas a cada 7 m. Para avaliar dos efeitos do preparo e da gessagem nos atributos físicos do solo foi conduzido um experimento em delineamento de blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos nas parcelas principais foram: com preparo mecanizado (gradagem + subsolagem) e a ausência de preparo do solo. Nas subparcelas, as doses de gesso aplicadas foram: 1; 2 e 4 Mg ha⁻¹; mais o controle (ausência de gesso), aplicadas em superfície à lanço, antes do preparo do solo. As amostras foram coletadas nas camadas entre as profundidades de 0-0,30 m e 0,30-0,60 m entre os sulcos de plantio. Foram avaliados a resistência tênsil dos agregados, diâmetro médio ponderado, resistência do solo à penetração de raízes, umidade gravimétrica, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, teor de cálcio no solo, a curva característica de retenção de água no solo, parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten, intervalo hídrico ótimo e produtividade de colmos da cana-de-açúcar. A densidade amostral mínima para estimar a produtividade da cana-de-açúcar foi de 14 amostras por hectare e dependeu da resistência à penetração e porosidade total do solo. O adensamento natural dos solos coesos pode ser reduzido pela irrigação, favorecendo aumentos significativos de produtividade, independente de outros atributos físicos do solo. As doses de gesso, no manejo com gradagem e subsolagem, reduziram a resistência tênsil dos agregados do solo. Entre os atributos físicos do solo, a sua resistência à penetração foi influenciada pelo preparo do solo, com menores valores nas parcelas mecanizadas. O preparo do solo com subsolagem foi eficiente em aumentar os teores de gesso em profundidade. A subsolagem foi mais efetiva em ampliar a faixa da densidade crítica do solo quando utilizada isoladamente. A dose de gesso com 2 Mg ha⁻¹ melhorou os atributos físico-hídricos do solo, com maior disponibilidade de água às plantas, pelo aumento da densidade crítica do solo, quando preparado com subsolagem. A melhoria nos atributos físico-hídricos do solo, devido a aplicação de gesso na dose 2 Mg ha⁻¹, aumentou a produtividade de colmos da cana-planta.

Palavras-chave: Gessagem. Densidade amostral. Geoestatística. Intervalo hídrico ótimo. Subsologem. Cana-de-açucar.

Physical attributes of soil cultivated with sugarcane under management systems

ABSTRACT

The knowledge of the spatial distribution of soil physical attributes, as well as practices of soil management and gypsum application is important to evaluate effects of agricultural operations on sugarcane productivity. In this context, the objective of this work was to study the best sample density, to determine the spatial variability, the effects of soil preparation with harrowing + subsoiling and the physical attributes of a dystrocohesive Yellow Argisol correlating with the productivity of sugarcane. In order to evaluate the spatial variability and sample density, a sample mesh was demarcated in a first cycle of sugarcane cultivation, where 32 equidistant samples were collected, spaced every 7 m. In order to evaluate the effects of the preparation and the gypsum on the physical attributes of the soil, an experiment was carried out in a randomized block design in a subdivided plots scheme with four replications, totalizing 32 experimental units. The treatments in the main plots were with mechanized preparation (harrowing + subsoiling) and the absence of soil preparation. In the subplots the doses of gypsum applied were 1; 2 and 4 t ha⁻¹ plus the control (absence of gypsum), applied on surface to the haul before tilling the soil. The samples were collected at depths of 0-0.30 m and 0.30-0.60 m between the planting furrows. Tensile strength of the aggregates, weighted mean diameter, penetration resistance of soil, gravimetric moisture, bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity, soil calcium content, soil water retention characteristic curve, adjustment parameters of the van Genuchten model, least limiting water range and sugarcane productivity. The minimum sample density to estimate sugarcane productivity was 14 samples per hectare and depended on the penetration resistance and total porosity of the soil. The natural densification of cohesive soils can be reduced by irrigation, favoring significant increases in productivity, independent of other soil physical attributes. The gypsum rates, in the management with harrowing and subsoiling, reduced the tensile strength of the soil aggregates. Among the soil physical attributes penetration resistance of soil was influenced by soil preparation with lower values in the mechanized plots. Soil preparation with subsoiling was efficient in increasing gypsum contents in depth. Subsoiling was more effective in increasing the critical soil bulk density range when used alone. The dose of gypsum with 2 Mg ha⁻¹ improved the physical-water attributes of the soil, with greater availability of water to the plants, by increasing the critical bulk density of the soil, when prepared with subsoiling. The improvement in soil physical-water attributes due to the application of 2 Mg ha⁻¹ increased cane-plant productivity.

Keywords: Gypsum, Sample density, Geostatistics, Least limiting water range, Subsoiling, Sugarcane

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 Hipoteses	18
1.2 Objetivo Geral	18
1.3 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
Referências Bibliográficas.....	24
3 CAPÍTULO I - VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ARGISSOLO COESO.....	29
Resumo	29
Abstract.....	30
3.1 Introdução.....	31
3.2 Material e Métodos.....	32
3.2.1 Caracterização da área do ensaio.....	32
3.2.2 Manejo do cultivo da cana-de-açúcar.....	35
3.2.3 Amostragem e avaliação dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de- açúcar.....	36
3.2.4 Procedimentos estatísticos.....	38
3.3 Resultados e Discussão.....	39
3.3.1 Indicadores estatísticos dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de- açúcar.....	39
3.3.2 Variabilidade estatística, geoestatística e suficiência amostral	42
3.3.3 Correlações dos atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar	45
3.3.4 Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar ..	46
3.4 Conclusões.....	49
Referências	49
4 CAPÍTULO II – CONDIÇÃO ESTRUTURAL E ATRIBUTOS FÍSICOS EM ARGISSOLO COESO SOB SISTEMAS DE MANEJO E DOSES DE GESSO.....	57
Resumo	57
Abstract.....	58

4.1 Introdução.....	59
4.2 Material e Métodos.....	60
4.2.1 Área de estudo	60
4.2.2 Manejo do cultivo da cana-de-açúcar	63
4.2.3 Delineamento experimental e tratamentos adotados	64
4.2.4 Análises físicas	65
4.2.5 Análises estatísticas	67
4.3 Resultados e Discussão.....	67
4.4 Conclusões.....	75
Referências Bibliográficas.....	75
5 CAPÍTULO III - ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE ARGISSOLO COESO SOB SISTEMAS DE MANEJO E DOSES DE GESSO	81
Resumo	81
Abstract.....	82
5.1 Introdução.....	83
5.2 Material e Métodos.....	85
5.2.1 Área de estudo	85
5.2.2 Manejo de cultivo da cana-de-açúcar	87
5.2.3 Delineamento experimental.....	89
5.2.4 Análises físicas	89
5.2.5 Análises estatísticas	92
5.3 Resultados e Discussão.....	92
5.4 Conclusões.....	107
Referências Bibliográficas.....	108
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	113

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. A *Saccharum officinarum* é uma das culturas mais importantes do país, especialmente para o nordeste brasileiro, onde além de ter grande valor histórico e cultural gera diversos empregos e contribui com a balança comercial da região. Contudo, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar na região nordeste é menor que a das demais regiões produtoras do país.

Na região nordeste a maioria dos canaviais estão em áreas sob domínio de solos com caráter coeso, como os Argissolos Amarelos coesos. Os solos com caráter coeso apresentam adensamento e, em muitos casos, as práticas de manejo do solo objetivam mitigar os efeitos da coesão natural desses solos, tais como a gradagem e a subsolagem e incrementar a produtividade agrícola da cultura.

A produtividade da cana-de-açúcar é muito variável na região, e depende da interação de diversos fatores edafoclimáticos, entre eles atributos físicos do solo. Assim é importante conhecer que práticas de manejo influenciam essa variação dos atributos do solo e, conseqüentemente, a produtividade da cultura. Essas práticas de manejo do solo, assim como processos naturais de formação do solo ocasionam variação nos atributos físicos.

A mecanização do solo pode ocasionar a fragmentação dos agregados. Essa quebra dos agregados em primeiro momento leva a aumentos da porosidade total e redução da densidade do solo. Contudo, a longo prazo, com a reorganização das partículas de solo, ocasiona a redução da porosidade e aumento a densidade do solo dificultando o crescimento radicular, por meio do aumento da resitência do solo à penetração de raízes.

Além das práticas mecânicas do solo, a correção do solo pode também influenciar os atributos físicos do solo e a disponibilidade hídrica às plantas. A aplicação de gesso em solos com elevado teores de alumínio pode reduzir a flocculação das partículas de solo com reflexo nos atributos físicos e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica, acarretando assim em uma variação da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

1.1 HIPOTESES

A variação espacial dos atributos do solo bem como as práticas de manejo e aplicação de gesso influenciam negativamente os atributos físicos do solo e, conseqüentemente, a produtividade da cana-de-açúcar

As doses de gesso associadas manejo com gradagem e subsolagem reduzem a agregação e resistência tênsil dos agregados do solo

O preparo do solo realizado antes do plantio da cana-de-açúcar, melhora os atributos físicos do solo

As doses de gesso e o preparo do solo melhoram os atributos físico-hídricos do solo, proporcionando maior disponibilidade de água às plantas.

1.2 OBJETIVO GERAL

Indicar a melhor densidade amostral, determinar a variabilidade espacial, os efeitos do preparo do solo com gradagem + subsolagem e da gessagem nos atributos físicos em um Argissolo Amarelo distrocoeso, correlacionando com a produtividade da cana-de-açúcar.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo e correlação existente entre a produtividade da cana-de-açúcar e as propriedades físicas do solo.

Estudar qual a melhor densidade amostral para representar os atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.

Avaliar os efeitos da gessagem aplicada superficialmente e incorporada com gradagem + subsolagem na estrutura, nos atributos físicos e nos teores de Cálcio em um Argissolo Amarelo distrocoeso

Avaliar o efeito do preparo do solo com gradagem + subsolagem e doses de gesso nos atributos físico-hídricos em um Argissolo Amarelo distrocoeso.

Determinar a curva característica de retenção de água no solo, o intervalo hídrico ótimo e a densidade crítica do solo após a aplicação de gesso em superficial e incorporado com gradagem + subsolagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

No Brasil estima-se que a cana-de-açúcar ocupe uma área pouco superior a 9 milhões de hectares, com produção aproximada de 700 milhões de toneladas de colmos e produtividade média de 76 toneladas na safra 2016/2017 (CONAB, 2016). Em Pernambuco, a agroindústria da cana-de-açúcar é uma das atividades agrícolas mais importantes, gerando muitos empregos diretos nas áreas rurais e industriais, proporcionando grande contribuição social (SIMÕES NETO et al., 2012). O estado de Pernambuco cultiva aproximadamente 3% da área nacional de cana-de-açúcar, sendo o sétimo maior produtor nacional, com área estimada de 250 mil hectares (CONAB, 2016). Apesar da importância dessa cultura no contexto estadual, a produtividade média pernambucana é de apenas 53 Mg ha⁻¹, ficando abaixo da média nacional dos seis principais produtores.

A baixa participação da região Nordeste na produção nacional indica carência de aporte tecnológico que aumente a produtividade da cultura, para que o setor sucroalcooleiro possa atender às crescentes necessidades do mercado agroenergético (MOURA et al., 2005). As principais causas da menor produtividade podem ser apontadas como a menor pluviosidade e o empobrecimento dos solos (OLIVEIRA et al., 2011).

As chuvas na região Nordeste não atendem a real necessidade hídrica das plantas, surgindo a importância da irrigação que, quando bem planejada, tem proporcionado retorno econômico (DANTAS NETO et al., 2006). A irrigação pode contribuir para acréscimo de produção, tanto por meio do aumento de produtividade, quanto na expansão das áreas produtoras para regiões com regimes pluviométricos insuficientes para as exigências hídricas da cultura. Deste modo, justificam-se pesquisas que contribuam para maximizar os efeitos da irrigação, como a correção do solo e práticas de seu preparo visando resultados diretos, especialmente para a cultura da cana, com aumento da produtividade e rendimento de açúcar e etanol.

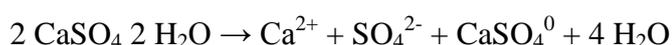
Além disso, a variabilidade do solo também pode influenciar a produtividade da cultura. Nesse aspecto, a variabilidade espacial de atributos do solo vem sendo estudada desde o século XX (VIEIRA, 2000). A utilização de técnicas geoestatística vem ganhando espaço nas ciências agrárias nos últimos anos e tem permitido conhecer melhor a variabilidade espacial de atributos do solo. A geoestatística é uma ferramenta eficaz para o estudo da variabilidade espacial dos solos, desde que se faça uma amostragem representativa da área, para que se possam obter valores que correspondam à realidade do ambiente amostrado (CAVALCANTE et al., 2011).

A causa dessa variação dos atributos do solo está na própria ação dos fatores de formação, como o material de origem e relevo. Esses fatores agem de forma descontínua durante o processo de formação do solo, levando à variações espaciais no solo formado (RICHTER et al., 2011). Além disso, as práticas de manejo do solo utilizadas durante as operações de seu preparo (CAVALCANTE et al., 2011) e tratos culturais (SILVA et al., 2003) têm contribuído para aumentar essa variabilidade espacial dos atributos físicos do solo. Segundo Cambardella et al. (1994) o conhecimento dessa variabilidade no solo é importante para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental.

A variabilidade dos atributos do solo pode ser tanto em atributos físicos, químicos e biológicos e pode influenciar a produtividade agrícola. Nos solos tropicais, um problema bastante comum são os elevados teores de alumínio, como ocorrem na Zona da Mata de Pernambuco, que reduzem o desenvolvimento radicular e, portanto, dificultam o acesso às reservas de água e nutrientes em profundidade. Assim, a utilização de gesso agrícola como forma de melhorar o ambiente radicular tem sido estudada (MORELLI et al., 1992; SOUSA et al., 1995). Neste sentido, a correção do solo também é uma técnica que pode contribuir para uma maior produtividade da cultura e melhor qualidade do produto (CAIRES et al., 2001).

Pesquisas objetivando a correção do solo já são bastante difundidas em várias regiões produtoras do Brasil (CAIRES et al., 2001; ROCHA et al., 2008; CARVALHO et al., 2013), e têm comprovado o efeito da gessagem no aumento dos teores de Ca^{2+} , SO_4^{2-} e valores da saturação por bases com redução dos teores de Al^{3+} , melhorando a distribuição radicular das culturas. De acordo com Caires et al. (2001) a aplicação de gesso proporciona melhoria na distribuição relativa do sistema radicular em profundidade, principalmente quando associado à calagem. Desta forma, pela melhor distribuição das raízes, a aplicação de gesso pode contribuir para que a planta resista melhor ao déficit hídrico (SOUSA et al., 1995).

Geralmente, na camada superficial do solo ocorre a dissociação do gesso, bem como a lixiviação pareada dos íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} e do par iônico CaSO_4 , conforme apresentado na reação abaixo:



Posteriormente, na camada subsuperficial, ocorrem a troca iônica do Al^{3+} na superfície de troca pelo Ca^{2+} , com a formação do par iônico AlSO_4^+ , que não é tóxico para as plantas. O Al^{3+} também pode ser precipitado na forma de oxihidróxido.

O efeito da gessagem depende da mobilidade do gesso no perfil do solo. Assim, é importante conhecer também a lixiviação de cátions no perfil do solo, que depende da

percolação de água no perfil e é influenciada pela precipitação e irrigação. Estudos nesse sentido têm sido realizados por meio da especiação iônica da solução do solo. A especiação é importante porque ajuda a compreender a variação da disponibilidade e mobilidade dos elementos na solução do solo (ZAMBROSI et al., 2007).

Por outro lado, apesar dos benefícios da gessagem sobre as propriedades químicas do solo, ela também pode promover redução da agregação em solos altamente intemperizados e ricos em Al^{3+} . De acordo com Nishimura et al. (2005) a troca de Al^{3+} pelo Ca^{2+} do gesso diminui a agregação do solo devido ao menor poder flocculante do Ca^{2+} em relação ao Al^{3+} . Desta forma, a prática da gessagem pode também interferir em outros atributos físicos do solo que são dependentes da agregação, como densidade e porosidade do solo.

A dispersão dos agregados pode também influenciar o armazenamento e disponibilidade de água, afetando assim a eficiência da irrigação e, conseqüentemente, a produtividade da cana-de-açúcar. Portanto, apesar de existir diversos estudos que avaliam o efeito da correção e manejo do solo na produção de espécies vegetais, poucos correlacionam conjuntamente esses efeitos em condição irrigada.

Normalmente, a aplicação de gesso ocorre junto à aplicação de calcário, utilizando-se para isso a gradagem. A prática da gradagem é também utilizada para a incorporação de restos culturais e para fornecer melhores condições iniciais e melhorar a distribuição do sistema radicular das espécies vegetais. No entanto, segundo Albuquerque et al. (2005), o revolvimento do solo expõe a matéria orgânica que estava protegida no interior dos agregados favorecendo sua oxidação, e, conseqüentemente, redução do seu teor, diminuindo a estabilidade de agregados dos solos.

O revolvimento do solo tem efeitos diretos nos seus atributos físicos e tem sido relatada a redução do tamanho médio dos agregados relacionada com essa prática (CORRÊA, 2002; FONTENELE et al., 2009). Além disso, Vasconcelos et al. (2010) observaram que diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar promoveram alterações na distribuição de agregados do solo, onde a estabilização destes dependeu do teor de matéria orgânica e da ação dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem do solo. Assim, variações no manejo do solo e nas condições de umedecimento, proporcionados pela irrigação ou precipitação, podem afetar de forma distinta a estabilidade de agregados e, conseqüentemente, outras propriedades físicas do solo.

O preparo do solo por meio da gradagem, embora em um momento inicial provoque melhoria na porosidade; em longo prazo, promove a redução da macroporosidade e condutividade hidráulica do solo, bem como o aumento da densidade do solo e da sua

resistência à penetração de raízes (SILVA; MIELNICZUK, 1998; BORTOLUZZI et al., 2008; BILIBIO et al., 2010).

A estabilidade estrutural afeta o desenvolvimento e produtividade das culturas, uma vez que está relacionada a atributos físicos do solo, como disponibilidade de ar e água às raízes, resistência mecânica à penetração e desenvolvimento do sistema radicular (CORRÊA, 2002; RIBEIRO et al., 2007).

A gradagem provoca a pulverização dos agregados na camada superficial, e o efeito cumulativo das passagens da grade em uma mesma profundidade leva a formação de camada compactada em subsuperfície, comumente denominada “pé-de-grade” (KAMIMURA et al., 2009; SANTOS, 2010). Essa compactação em subsuperfície também pode impedir o pleno desenvolvimento radicular em profundidade e, conseqüentemente, reduzir a disponibilidade de água às culturas.

A compactação promove um aumento da massa de solo por unidade de volume ocupado, causando maior densidade do solo e resistência do solo à penetração de raízes, com redução linear da porosidade total e redistribuição dos tamanhos de poros, com diminuição dos macroporos, afetando, assim, a condutividade hidráulica (TAVARES FILHO et al., 2001; STONE et al., 2002).

A manutenção de uma adequada umidade no solo durante todo o período de crescimento é um fator importante para obter os rendimentos potenciais da cultura, visto que o crescimento vegetativo é proporcional à água transpirada (DALRI et al., 2008).

A disponibilidade de água às plantas, além de ser influenciada por fatores externos à cultura, depende também de fatores intrínsecos do solo. Klein e Libardi (2000) afirmam que os fatores do solo que afetam a disponibilidade de água às culturas são: a estrutura do solo; a distribuição do diâmetro dos poros; a textura; o tipo e quantidade de argila e o teor de matéria orgânica. Assim, a interação desses fatores irá descrever a capacidade do solo em armazenar água, apresentando grande variabilidade temporal e espacial.

A distribuição dos poros na matriz do solo desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, determinando a evolução espacial e temporal dos processos que envolvem o movimento da água no solo, bem como o comportamento físico-hídrico do solo, influenciando a sua potencialidade agrícola (RIBEIRO et al., 2007).

Portanto, o pleno crescimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas é influenciado por vários atributos físicos do solo, com complexas interações que envolvem o potencial da água no solo, o teor de oxigênio e a resistência do solo à penetração das raízes (TORMENA et al., 1998).

Neste sentido, a curva característica de retenção de água pelo solo (CCRAS) é uma ferramenta eficiente para avaliar o armazenamento de água em diferentes tensões. Silva et al. (2010) afirmam que a CCRAS descreve graficamente a habilidade do solo para armazenar água em diferentes tensões e expressa a relação entre a energia com que a água está retida (potencial matricial, Ψ) e seu respectivo conteúdo de água no solo (θ). Assim, a CCRAS é elaborada pela determinação do conteúdo de água no solo em diferentes tensões (JORGE et al., 2010).

A partir da CCRAS pode-se obter a distribuição dos tamanhos de poros (macro, meso, microporos e crioporos). Além disso, a CCRAS fornece dados para outras características de retenção de água no solo, que são utilizadas como atributos indicadores da sua qualidade física, como água disponível (SANTOS, 2010).

Neste cenário, a textura do solo aparece como fator importante no entendimento da disponibilidade/retenção de água do solo para as plantas. Carducci et al. (2011) afirmaram que o aumento do conteúdo de argila influenciou a retenção de água, aumentando a capilaridade e a adsorção de água. De modo geral, em elevados Ψ (menos negativos), a curva é influenciada por poros estruturais, associados ao efeito da matéria orgânica na formação e estabilidade da estrutura do solo; enquanto que em baixos Ψ (mais negativos), a composição granulométrica e mineralógica do solo torna-se mais importantes, devido às superfícies disponíveis para a adsorção de água (MACHADO et al., 2008).

Historicamente, Viehmeyer e Hendrickson (1927) afirmaram que o conceito de água disponível no solo compreendia a água situada entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). No entanto, além da CC e do PMP, outras propriedades físicas do solo, como porosidade de aeração e resistência do solo à penetração das raízes, também influenciam a disponibilidade de água (LETEY, 1985).

Eavis (1972) e Phene e Beale (1976) já demonstravam preocupação em associar o crescimento de plantas com os atributos físicos do solo, distinguindo aqueles fatores relacionados direta e indiretamente a este crescimento. Neste sentido, segundo alguns autores (TORMENA et al., 1998; KLEIN; CAMARA, 2007), a porosidade mínima de aeração (macroporosidade) deve ser da ordem de 10%. Já para Llanillo et al. (2006) a porosidade total mínima deve ser de 30%, sendo considerada crítica às culturas, para solos de textura média. De acordo com Arshad et al. (1996), valores de resistência à penetração acima da faixa entre 2 e 4 MPa restringem o desenvolvimento radicular. Contudo, para outros autores, valores acima de 2 MPa são mais aceitos como condições impeditivas para o crescimento das raízes e parte aérea de plantas, como salientam Tormena et al. (1998).

Desta forma, um novo conceito para disponibilidade de água às plantas foi proposto por Silva et al. (1994): o intervalo hídrico ótimo (IHO), sendo introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998). Segundo estes autores, o IHO integra, além das variáveis tradicionalmente utilizadas (CC e PMP), outras duas que são também apropriadas para avaliação da disponibilidade de água. Assim, o limite inferior do IHO é o conteúdo de água no PMP ou a umidade na qual a resistência do solo à penetração é de 2,0 MPa; e o limite superior é o conteúdo de água no solo na CC ou a umidade na qual a porosidade de aeração mínima é de 10%. O IHO é definido por Tormena et al. (1998) como a faixa de conteúdo de água no solo em que as limitações para o crescimento das plantas em função do potencial mátrico, aeração e resistência à penetração do solo são nulas.

Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, J.A.; ARGENTON, J.; BAYER, C.; WILDNER, L.P.; KUNTZE, M.A.G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para a cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.3 p.415-424, 2005.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. **Physical tests for monitoring soil quality**. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141..

BILIBIO, W.D.; CORRÊA, G. F.; BORGES, E.N. Atributos físicos e químicos de um Latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.4, p.817-822, 2010.

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

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.3 p.213-223, 2001.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5 p.1501- 1511, 1994.

CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.1, p.77-86, 2011.

CARVALHO, J.M.; ANDREOTTI, M.; BUZZETTI, S.; CARVALHO, M.P. Produtividade de cana soca sem queima em função do uso de gesso e vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.43, n.1, p.1-9, 2013.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.13, p.237-243, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana- de- açúcar: terceiro levantamento: dezembro de 2016**. Brasília: Conab, 2016. 78p.

CORRÊA, J.C. Efeitos de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.2, p.203-209, 2002.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L.; GARCIA, C.J.B.; DUENHAS, L.H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana- de- açúcar. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.1, p.1- 11, 2008.

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

EAVIS, B.W. Soil physical condition affecting seedling rootgrowth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability and moisture levels in a sandy loam soil. **Plant Soil**, The Hague, v.36, n.3, p.613-622, 1972.

FONTENELE, W.; SALVIANO, A.A.C.; MOUSINHO, F.E.P. Atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob sistemas de manejo no cerrado piauiense. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.40, n.2, p.194-202, 2009.

JORGE, R.F.; CORÁ, J.E.; BARBOSA, J.C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um Latossolo Vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.6, p.1831-1840, 2010.

KAMIMURA, K.M.; ALVES, M.C.; ARF, O.; BINOTTI, F.F.S; Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho sob cultivo do arroz de terras altas em diferentes manejos do solo e da água. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.723-731, 2009.

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

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.6, p.959-964, 2000.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v.1, n.1, p.277-294. 1985.

LLANILLO, R.F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M.F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.27, n.2, p.205-220, 2006.

MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.495-502, 2008.

MORELLI, J.L.; DALBEN, A.E.; ALMEIDA, J.O.C.; DEMATTÊ, J.L.I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um Latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.16, n.1, p.187-194, 1992.

MOURA, M.V.P.S.; FARIAS, C.H. de A.; AZEVEDO, C.A.V. de; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, H.M. de; PORDEUS, R.V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.4, p.753-760, 2005.

NISHIMURA, T.; YAMAMOTO, T.; SUZUKI, S.; KATO, M. Effect of Gypsum and Polyacrylamide Application on Erodibility of an Acid Kunigami Mahji Soil. **Soil Science e Plant Nutrition**, Temuco, v. 51, n.5, p. 641-644, 2005.

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

PHENE, C.J.; BEALE, O.W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.40, n.3, p.430-436, 1976.

RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.

RICHTER, R. L.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ALBA, P. J.; HANSEL, F. D. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo sob plantio direto influenciados pelo relevo e profundidade de amostragem. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.7, n.13, p.1043-1059, 2011.

ROCHA, A.T.; OLIVEIRA, A.C.; RODRIGUES, A.N.; LIRA JUNIOR, M.A.; FREIRE, F.J. Emprego de gesso do Araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.3, n.4, p.307-312, 2008.

SANTOS, G.G. **Impactos de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo**. 2010. 125p. Tese (Doutorado) –Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

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

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. In van LIER, Q.J. **Física do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2010. p.241-282.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.311-317, 1998.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

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

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro - I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos Cerrados**. Planaltina, Embrapa-CPAC, 1995. 20p. (EMBRAPA-CPAC, Circular Técnica, 32).

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.725-730, 2001.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

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**, Viçosa, v.34, n.11, p.309-316, 2010.

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**, Rockville, v.2, n.1, p.71-78, 1927.

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

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F.; CAIRES, E.F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.1, p.110-117, 2007.

3 CAPÍTULO I - VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ARGISSOLO COESO

Resumo

A produtividade da cana-de-açúcar é muito variável espacialmente e o conhecimento da distribuição espacial dos atributos físicos do solo é importante para orientar práticas de manejo e avaliar efeitos das operações agrícolas sobre a produtividade. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar qual a melhor densidade amostral para representar os atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso e determinar a variabilidade espacial destes atributos físicos, correlacionando-os com a produtividade da cana-de-açúcar. Foi demarcada uma malha amostral em cultivo de primeiro ciclo de cana-de-açúcar, onde foram coletadas 32 amostras equidistantes, espaçadas a cada 7 m. As amostras foram coletadas em estrutura preservada para determinação da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade. Foram também coletadas amostras em estrutura não preservada para determinação da umidade gravimétrica. Para a avaliação da resistência mecânica do solo à penetração foi utilizado um penetrômetro. A produtividade agrícola foi também mensurada nos mesmos locais de realização das coletas de solo. Foi realizada estatística descritiva e análise geoestatística para avaliar a variabilidade dos dados e correlação entre produtividade agrícola e atributos físicos do solo. Os mapas de krigagem permitem identificar regiões homogêneas e heterogêneas na área, indicando que as técnicas geoestatísticas foram eficientes na caracterização geoespacial. A densidade amostral mínima para estimar a produtividade da cana-de-açúcar foi de 14 amostras por hectare e dependeu da resistência à penetração e porosidade total do solo. O adensamento natural dos solos coesos pode ser reduzido pela irrigação, favorecendo aumentos significativos de produtividade, independente de outros atributos físicos do solo.

Palavras-chave: Manejo de solo. Agricultura de precisão. Densidade amostral. Geoestatística.

CHAPTER I - SPACE VARIABILITY OF PHYSICAL ATTRIBUTES AND PRODUCTIVITY OF SUGAR CANE IN ULTISOL COHESIVE

Abstract

Sugarcane productivity is highly spatially variable and the knowledge on the spatial distribution of soil physical attributes is important to guide management practices and evaluate the effects of agricultural operations on the productivity. In this context, the objective of this study was to evaluate which is the best sampling density to represent the physical attributes of a dystrocohesive Yellow Ultisol and determine the spatial variability of these physical attributes, correlating them with the sugarcane productivity. A sampling grid was delimited in sugarcane plantation in its first cycle, where 32 samples were equidistantly collected, spaced by 7 m. The samples were collected with undisturbed structure for the determination of soil density, total porosity, macroporosity and microporosity. In addition, samples with disturbed structure were also collected for the determination of gravimetric moisture. A penetrometer was used to evaluate the mechanical resistance of the soil. Agricultural productivity was also measured in the same sites of soil sampling. Descriptive statistics and geostatistical analysis were applied to evaluate data variability and correlation between agricultural productivity and soil physical attributes. Kriging maps identified homogeneous and heterogeneous regions in the area, indicating that the geostatistical techniques were efficient in the geospatial characterization. The minimum sampling density to estimate sugarcane productivity was 14 samples per hectare and depended on the resistance to penetration and total porosity of the soil. The natural densification of cohesive soils can be reduced by irrigation, favoring significant increases of productivity, regardless of the other soil physical attributes.

Keywords: Soil management. Precision agriculture. Sampling density. Geostatistics.

3.1 Introdução

A substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia é uma das formas para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera e mitigar mudanças climáticas globais (NEAMHOM et al., 2016). A utilização de etanol como combustível de fonte renovável de energia contribui para uma emissão líquida de CO₂ próxima a zero por ser obtido a partir de plantas que fixam o CO₂ atmosférico. Adicionalmente, dependendo da planta utilizada como matéria prima para produção de etanol, a redução da emissão de GEE pode ser mais efetiva, como o etanol produzido a partir de cana-de-açúcar, comparativamente ao etanol produzido a partir de milho e beterraba devido ao elevado rendimento de sacarídeos e a substituição de combustíveis fósseis por energia renovável produzida a partir da fibra (bagaço) (RENOUF et al., 2008).

O etanol no Brasil é produzido principalmente pela cana-de-açúcar e o país é o principal produtor mundial dessa cultura (CARVALHO et al., 2016). A área a ser colhida no Brasil na safra 2016/2017 deve ser de aproximadamente 9 milhões de hectares e a produção de etanol estimada é de 27,5 bilhões de litros (CONAB, 2016). A agroindústria do açúcar e etanol no estado de Pernambuco é uma das atividades agrícolas mais importantes, gerando muitos empregos nas áreas rurais e industriais, proporcionando grande contribuição social (SIMÕES NETO et al., 2012).

A maioria das áreas canavieiras do estado de Pernambuco situa-se na zona da mata e no litoral. Especificamente, na zona da mata norte há extensas áreas de sedimentos do grupo barreiras do terciário, com predominância de solos distróficos coesos, principalmente os Argissolos Amarelos (SANTOS et al., 2013), correspondentes ao Ultisol (SOIL SURVEY STAFF, 1993), que são morfologicamente uniformes, porém com elevada variação granulométrica nos sedimentos do material de origem (CPRM, 2001).

Essa variação da granulometria pode promover alterações nos atributos físicos do solo e, conseqüentemente, na produtividade da cana-de-açúcar, mesmo em pequenas áreas, conforme observado por Silva et al. (2015a). Alguns estudos demonstraram que a variabilidade espacial da produtividade das culturas e dos atributos físicos do solo apresentaram correlação ou dependência espacial (CAMPOS et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2016; SOARES et al., 2016).

A resistência mecânica do solo à penetração tem sido empregada para avaliar sistemas de uso e manejo, por estar relacionada diretamente com o crescimento das plantas e ser de fácil determinação (LIMA et al., 2006; SILVA et al., 2012). A resistência do solo à penetração tem correlação direta com o crescimento radicular e tem sido a melhor forma para

estimar o impedimento mecânico do solo ao crescimento radicular, sendo um indicador tão sensível à compactação do solo, quanto à densidade do solo (CARVALHO et al., 2006; FREDDI et al., 2009). A resistência à penetração está diretamente correlacionada com outros atributos físicos do solo como textura, densidade e, principalmente, umidade podendo ser influenciada pela coesão (STOLF et al., 1983; BUSSCHER et al., 1997; GIAROLA et al., 2001).

A porosidade do solo é outro atributo físico que pode influenciar o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, limitar a produtividade das culturas. Para um adequado desenvolvimento do sistema radicular, em geral a porosidade mínima de aeração (macroporosidade) deve ser da ordem de 10% (TORMENA et al., 1998; KLEIN; CAMARA, 2007).

Como a produtividade da cana-de-açúcar da zona da mata norte do estado de Pernambuco é muito variável espacialmente e o cultivo é em solos coesos, pode ser que algum atributo físico do solo possa ser responsável por essa variabilidade. Assim, o conhecimento da distribuição espacial dos atributos físicos do solo pode ser importante para orientar práticas de manejo e avaliar efeitos das operações agrícolas sobre a produtividade da cana-de-açúcar (CAMBARDELLA et al., 1994). Dentro deste contexto, a geoestatística pode ser uma ferramenta eficaz para o estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade, desde que se faça uma amostragem representativa da área, para que a variabilidade estimada corresponda ao ambiente amostrado (CAVALCANTE et al., 2011).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a melhor densidade amostral para representar os atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso e determinar a variabilidade espacial destes atributos físicos, correlacionando-os com a produtividade da cana-de-açúcar.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Caracterização da área do ensaio

O trabalho foi realizado na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina - PE (7°51'13"S, 35°14'10"W), no período entre junho de 2014 e outubro de 2015, no primeiro ciclo de cultivo de cana-de-açúcar. O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo Ams, tropical chuvoso de monção, com verão seco e a altitude do município é de 180 m. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013), correspondente ao Ultisol (SOIL SURVEY STAFF, 1998). O solo

foi caracterizado física e quimicamente e estas propriedades podem ser observadas na Tabela 1.

Fisicamente o solo foi caracterizado seguindo-se metodologia preconizada por Dane e Topp (2002), resumidamente comentada a seguir.

Na análise granulométrica, para definir a distribuição de partículas sólidas por tamanho (areia, silte e argila) e classe textural do solo, foi utilizado o método do densímetro, segundo Gee e Or (2002), com adaptações conforme comentadas em Almeida (2008), onde a leitura da fração argila é realizada após 24h, a areia é obtida por peneiramento, e o silte calculado por diferença [$\text{silte}_{\%} = (\text{areia}_{\%} + \text{argila total}_{\%}) - 100$]. Com os dados das argilas total e dispersa em água, calculou-se o grau de floculação (GF) e o grau de dispersão (GD).

A densidade das partículas sólidas do solo (DP) foi obtida pelo método do picnômetro (FLINT; FLINT, 2002a); e a densidade do solo (DS), pelo método do anel volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

A porosidade total (PT) foi determinada de acordo com Flint e Flint (2002b). A macroporosidade (MaP) foi calculada usando os dados da PT e MiP ($\text{MaP} = \text{PT} - \text{MiP}$). A microporosidade (MiP) e umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) foram obtidas usando a Mesa de Tensão (ROMANO et al., 2002); sendo a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) determinada via Câmara de Richards (DANE; HOPMANS, 2002).

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi obtida pelo método do permeâmetro de carga constante, por meio da aplicação da equação de Darcy, segundo metodologia sugerida em Reynolds e Elrick (2002).

Tabela 1. Atributos físicos e químicos na camada superficial do Argissolo Amarelo distrocoeso utilizado no experimento

Atributo	Valor/teor/classificação
pH (H ₂ O)	4,60
Ca (cmolc dm ⁻³)	1,30
Mg (cmolc dm ⁻³)	0,30
K (cmolc dm ⁻³)	0,10
Na (cmolc dm ⁻³)	0,03
Al (cmolc dm ⁻³)	0,50
H+Al (cmolc dm ⁻³)	4,40
CTC _{efetiva} (cmolc dm ⁻³) ¹	2,23
CTC _{potencial} (cmolc dm ⁻³) ²	6,13
V (%) ³	28,21
m (%) ⁴	22,44
P (mg dm ⁻³)	9,00
Carbono orgânico total (g kg ⁻¹)	9,6
Areia (g kg ⁻¹)	656,50
Silte (g kg ⁻¹)	91,00
Argila (g kg ⁻¹)	252,50
Classe textural	Franco-argilo-arenosa
Grau de floculação (%)	14,85
Grau de dispersão (%)	85,15
Densidade de partículas (Mg m ⁻³)	2,61
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	1,55
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,41
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,14
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,27
Capacidade de campo (m ³ m ⁻³)	0,24
Ponto de murcha permanente (m ³ m ⁻³)	0,17
Condutividade hidráulica (mm h ⁻¹)	69,92

¹CTC_{efetiva}: Capacidade de troca catiônica efetiva; ²CTC_{potencial}: Capacidade de troca catiônica potencial; ³V: Saturação por bases; ⁴m: Saturação por alumínio

3.2.2 Manejo do cultivo da cana-de-açúcar

A área agrícola utilizada foi implantada em sistema convencional de cultivo de cana-de-açúcar, utilizando-se a cultivar RB867515, preparada para implantação do experimento em junho de 2014. O manejo para renovação do canavial consistiu na dessecação da socaria do cultivo anterior, utilizando o herbicida Glyfosate® na dosagem de 4,0 L ha⁻¹.

A correção do solo consistiu na aplicação de 3,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de 79,3% (33,6% CaO e 17,8% MgO). A necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases, com o objetivo de elevar a V para 60% da CTC_{potencial} do solo (Raij et al., 1997). O calcário foi aplicado à lanço em superfície e incorporado até 0,30 m de profundidade.

Após a abertura dos sulcos (60 dias após a aplicação de calcário), o plantio foi realizado manualmente no mês de Agosto de 2014, utilizando-se rebolos de três gemas, distribuídos em sete sulcos com oito metros de comprimento cada, para que se atingisse uma densidade de plantio de 16 a 18 gemas por metro linear.

Na adubação de plantio foi aplicado no fundo do sulco 500 kg ha⁻¹ da formulação 12-24-18 e as fontes de N, P e K utilizadas foram sulfato de amônio + ureia, fosfato monoamônio e cloreto de potássio, respectivamente.

O cultivo da cana-de-açúcar foi conduzido sob irrigação plena. Utilizaram-se aspersores com dois bocais (4,0 x 2,8 mm) e vazão nominal de 1,29 m³ h⁻¹, dispostos em campo num espaçamento de 12 x 12 m. Foram realizadas irrigações a cada dois dias, sendo a lâmina de irrigação calculada pelo somatório da evapotranspiração da cultura (E_c), menos eventuais precipitações pluviais no período. A evapotranspiração da cultura foi calculada com base no produto do coeficiente da cultura (K_c) pela evapotranspiração de referência (E_{tr}), estimada pela evaporação do Tanque Classe A, de acordo com Allen et al. (1998). A lâmina total de irrigação aplicada foi de 786 mm e a precipitação pluvial foi de 1.029 mm (Figura 1).

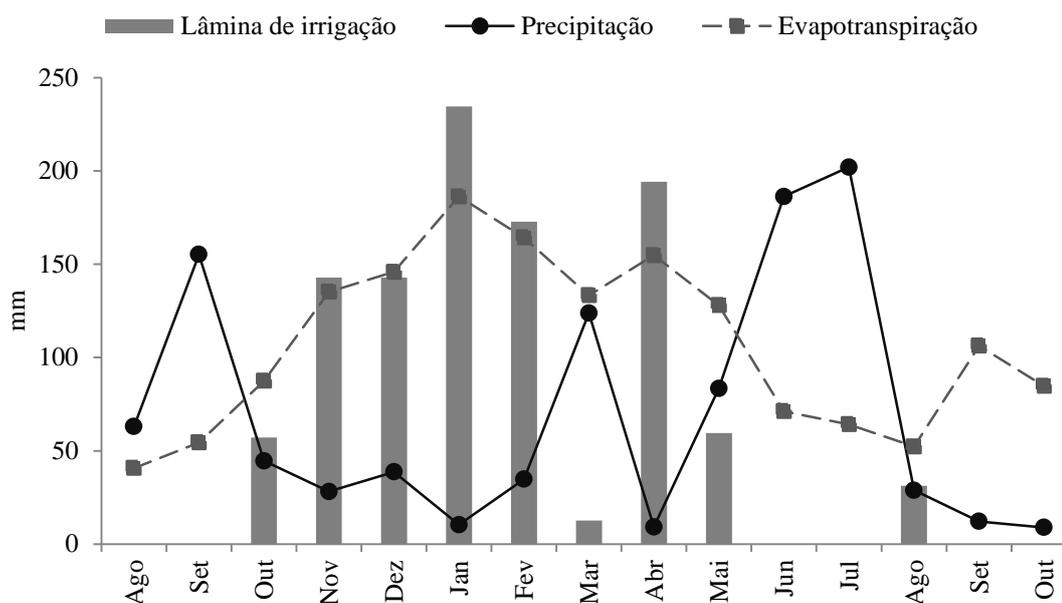


Figura 1. Precipitação, evapotranspiração e lâmina de irrigação durante o ciclo da cana-planta na área do experimento na EECAC

3.2.3 Amostragem e avaliação dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar

O experimento foi representado por um retângulo de 56 x 35 m (malha amostral), perfazendo uma área total de 1.960 m², onde foram demarcados pontos equidistantes, espaçados a cada 7 m, totalizando 32 pontos amostrados (Figura 2). Esses pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin Etrex (South American´69), para posterior construção do modelo digital de elevação (MDE).

Foram coletadas amostras em estrutura preservada em cilindros volumétricos (aço inoxidável, $\cong 10^{-4}$ m³) na camada entre as profundidades de 0,0-0,30 m para determinação da DS, PT, MaP e MiP. Foram também coletadas amostras deformadas, na mesma camada, para determinação da umidade gravimétrica (U).

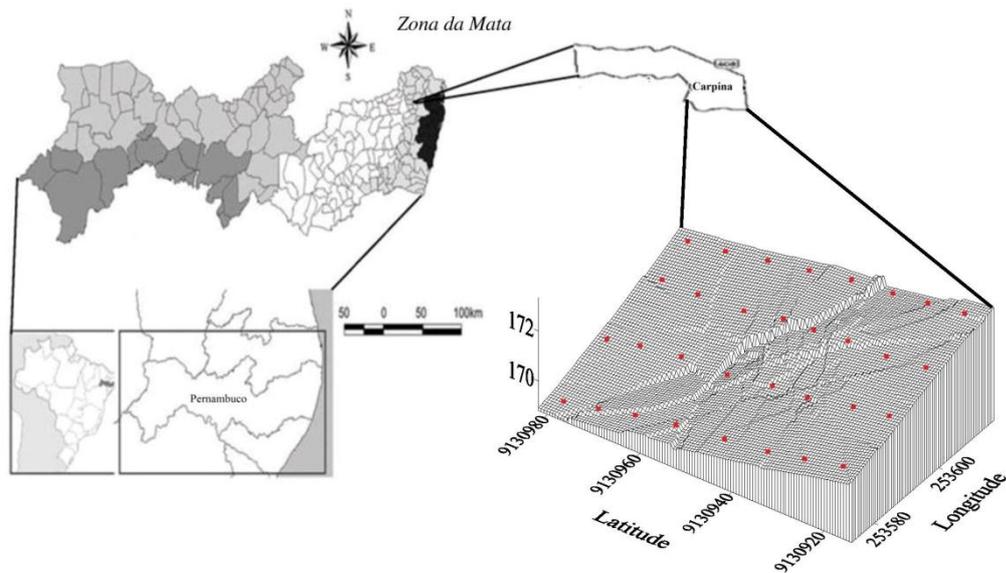


Figura 2. Localização, latitude, longitude, altitude e modelo de elevação digital da área, com destaque (pontos em vermelho) para os pontos amostrados

Para a avaliação da resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi utilizado *in situ* um penetrômetro digital FALKER[®], modelo PenetroLOG – PLG 5300, com haste metálica e extremidade em cone tipo C2 com 12,2 mm de diâmetro. O penetrômetro registrou e armazenou leituras a cada 0,01 m de profundidade, coletando-se os dados até a profundidade de 0,30 m. Com o objetivo de melhor caracterizar a distribuição geoespacial foram realizadas nove leituras sequenciais em cada ponto amostral. Os dados da RP foram correlacionados aos da U, sendo esta determinada na mesma camada de obtenção da RP (0,0-0,30 m), a partir da relação entre a massa de solo úmido e massa de solo seco em estufa a 105 °C (TOPP; FERRÉ, 2002).

A PT do solo foi determinada usando o método de umidade volumétrica de saturação, sendo calculada pela relação entre o volume de poros saturados e volume de solo (Flint e Flint, 2002b). A MaP foi obtida a partir do equilíbrio do conjunto anel-solo, entre o peso do solo saturado (0 kPa) e aplicação da tensão de 6 kPa. A MiP foi obtida após subtração do peso do conjunto anel-solo equilibrados à 6 kPa e o seu respectivo peso seco em estufa a 105 °C. Para os equilíbrios das tensões usadas em MaP e MiP foi utilizada a mesa de tensão conforme sugerido em Romano et al. (2002). A DS foi determinada pelo método do anel volumétrico (aço inoxidável, $\cong 10^{-4} \text{ m}^3$), a partir da relação entre a massa de sólidos contida no seu interior (seca em estufa a 105 °C) e o volume do anel volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

Para estimativa da produtividade (PROD) foi utilizado o método proposto por Gheller et al. (1999), que se baseia na contagem de todos os colmos maiores que 1 m nas três linhas centrais antes do tombamento da cana-de-açúcar. Nestes três sulcos foram pesadas 20 plantas, escolhidas aleatoriamente. Com isso, obteve-se a média de peso por planta. Assim, o peso médio por colmo foi estimado por meio da equação (1):

$$pmc = \frac{pf}{t_{colmos}} \quad (1)$$

em que: pmc é o peso médio por colmo; pf é o peso total dos colmos colhidos; e t_{colmos} é o total de colmos amostrados.

O peso médio estimado da parcela (pmp) foi calculado pela equação (2). A partir do peso médio estimado por parcela calculou-se a PROD por hectare.

$$pmp = pmc \times \text{total de colmos da parcela} \quad (2)$$

3.2.4 Procedimentos estatísticos

Os dados obtidos dos atributos físicos e da PROD foram avaliados inicialmente pela análise exploratória, calculando-se a média, a mediana, o desvio-padrão, a variância, o coeficiente de variação (CV), o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose. O CV foi classificado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), que classifica CV: baixo (< 12%); médio (12 a 24%) e alto (> 24%).

Para testar a hipótese de normalidade dos dados foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov (FISHER, 1990) e para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística (VIEIRA et al., 1983). Pela teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação (3):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (3)$$

em que: h é o valor da semivariância para uma distância h; N (h) é o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; Z (xi) é o valor do atributo Z na posição xi; Z (xi+h) é o valor do atributo Z, separado por uma distância h da posição xi.

O modelo matemático com os valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$ foi ajustado e definidos os coeficientes para o semivariograma (efeito pepita, C_0 ; variância estrutural, C_1 ; patamar, $C_0 + C_1$; e alcance, a). O efeito pepita é o valor da semivariância para uma distância maior do que zero e menor do que a menor distância de amostragem, e representa o componente da

variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante; e o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (TRANGMAR et al., 1986).

Para determinar a dependência espacial (DE) foi utilizado o exame de semivariogramas (Robertson, 1998). Para classificar a DE dos atributos físicos do solo e da PROD da cana-de-açúcar foi utilizada a classificação de Cambardella et al. (1994). Por essa classificação, a DE é considerada forte quando os semivariogramas têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar; moderada, quando está entre 25% e 75%; e fraca, quando é maior do que 75%.

Os semivariogramas serviram como base de informação para calcular o número mínimo de coleta de amostras do solo (CRESSIE, 1991) conforme equação (4):

$$N = \frac{A}{(a^2)/10000} \quad (4)$$

em que: **N** é o número mínimo de coleta de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem; **A** é a área total em hectare (ha); e **a** é o alcance do semivariograma em metros (m).

Para avaliar o grau de correlação entre os atributos físicos do solo e a PROD da cana-de-açúcar foi utilizado o coeficiente de correlação linear de Pearson (FISHER, 1990).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Indicadores estatísticos dos atributos físicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar

Os dados médios de RP nesse estudo foram de 2,70 MPa e classificados como de alta resistência à penetração, de acordo com Soil Survey Staff (1998). A alta RP pode ser devido ao caráter coeso do solo, associado à baixa U ($0,09 \text{ kg}^3 \text{ kg}^{-3}$), no momento da sua determinação *in situ* (Tabela 2). A RP é o indicador mais sensível da coesividade do solo, que em condição de coesão pode variar de 0,98 a 8,5 MPa, dependendo da umidade do solo (LIMA et al., 2004).

Tabela 2. Indicadores estatísticos e atributos físicos do Argissolo Amarelo distrocoeso (0 – 0,30 m) e produtividade agrícola no primeiro ciclo da cana-planta

Estatística Descritiva	RP ¹	U ²	DS ³	PT ⁴	MaP ⁵	MiP ⁶	PROD ⁷
	(MPa)	(kg ¹ kg ⁻¹)	(Mg m ⁻³)		m ³ m ⁻³		(Mg ha ⁻¹)
Média	2,70	0,09	1,50	0,40	0,19	0,20	161,41
Mediana	2,70	0,10	1,51	0,40	0,20	0,21	157,52
Desvio-padrão	0,59	8,7 x 10 ⁻³	0,08	2,7 x 10 ⁻²	0,05	0,03	18,45
Variância	0,35	7,5 x 10 ⁻⁵	6,6 x 10 ⁻³	7,0 x 10 ⁻⁴	2,4 x 10 ⁻³	8,0 x 10 ⁻⁴	340,33
CV ⁸ (%)	22,04	8,90	5,43	6,55	24,65	13,68	11,43
Curtose	-0,30	0,55	-0,94	-1,08	-1,13	-0,72	0,08
Assimetria	0,18	0,14	-0,12	0,06	0,10	-0,33	0,21
Normalidade	0,13*	0,03 ^{ns}	0,08*	0,10*	0,11*	0,09*	0,11*

¹RP: Resistência do solo à penetração de raízes; ²U Umidade gravimétrica; ³DS: Densidade do solo; ⁴PT: Porosidade total; ⁵MaP: Macroporosidade; ⁶MiP: Microporosidade; ⁷PROD: Produtividade; ⁸CV: Coeficiente de variação. *Significativo à 0,05 de probabilidade; ^{ns}Não significativo.

Os dados médios de DS foram altos (1,50 Mg m⁻³), mas estão dentro da faixa de 1,47 – 1,54 Mg m⁻³, cujos valores também foram encontrados por outros pesquisadores, em condições similares ao do nosso estudo (Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar), como determinado por Tavares et al. (2012). Já comparando com os valores de DS encontrados por Melo et al. (2014), 1,67 Mg m⁻³, nas mesmas condições, os valores deste estudo foram menores (Tabela 2).

A DS crítica ao desenvolvimento das plantas e produtividade das culturas tem sido reportada como sendo de 1,40 Mg m⁻³, de acordo com Arshad et al. (1996). No entanto, estudando também Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, Farias et al. (2013) verificaram que 1,63 Mg m⁻³ foi a densidade crítica ao desenvolvimento da cultura. Grande parte desta variação nos valores de DS é devido às diferenças na PT dos solos, de modo que a DS e a PT estão muito relacionadas, e por isso devem ser apresentadas de forma conjunta (LLANILLO et al., 2006).

Os dados médios de PT desse estudo foram de 0,40 m³ m⁻³ (Tabela 2) e estão acima do limite crítico para o desenvolvimento das plantas em solos de textura média, que é 0,30 m³ m⁻³ (Llanillo et al., 2006). No entanto, a PT determinada nesse estudo foi semelhante à mensurada por Silva et al. (2015b) e maior do que a relatada por Mion et al. (2012), que foi de 0,37 m³ m⁻³, também em Argissolo Amarelo distrocoeso. Essas diferenças podem ser

explicadas pela própria variabilidade do solo provocada pelas práticas de manejo ou mesmo por fatores de formação do solo.

Os valores médios da MaP e da MiP foram semelhantes (0,19 e 0,20 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente), podendo ser explicados pelo efeito da gradagem realizada no solo durante as operações de plantio, levando os seus valores para o mesmo patamar, aumentando a MaP e reduzindo a MiP (Tabela 2). Estes valores também foram observadas por Zuffo et al. (2013) em Argissolo Amarelo coeso do Espírito Santo, cultivado em sistema convencional, com MaP de 0,19 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e MiP 0,21 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, esses autores afirmam que os efeitos dos sistemas são mais nítidos no que diz respeito a forma e distribuição de poros.

A MaP foi superior ao valor crítico considerado para uma adequada aeração do solo, que, segundo Klein e Camara (2007), é 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Neste contexto, os valores mais elevados da MaP podem estar relacionados ao revolvimento que o solo foi submetido durante as operações de preparo mecanizado da área para plantio da cana-de-açúcar; que pode ter favorecido a conservação, ou até aumento, de poros maiores em detrimento aos de menor tamanho.

De acordo com Tormena et al. (2002) o aumento da MaP nos sistemas de cultivo com revolvimento se deve a persistência deste efeito no solo, que resulta em fraturamento dos agregados, com formação de poros maiores. No entanto, este efeito tende a desaparecer, porque as partículas de solo em função do tempo se reagrupam e provocam redução na MaP (SILVA et al., 2015b).

Com relação a PROD da cana-de-açúcar no experimento de campo, obteve-se valores médios de 161,4 Mg ha^{-1} (Tabela 2), sendo superior a relatada por Silva et al. (2014), com 127,9 Mg ha^{-1} ; e inferior a obtida por Oliveira et al. (2011), 186,0 Mg ha^{-1} , para a mesma variedade de cana-de-açúcar ao deste estudo, também sob cultivo irrigado. No entanto, os resultados obtidos foram semelhantes aos relatados por Andrade Júnior et al. (2012), para mesma variedade, mas em Plintossolo, textura média a argilosa.

A maior PROD verificada por Oliveira et al. (2011) pode estar relacionada a uma menor DS (1,44 Mg m^{-3}), onde a cana-de-açúcar foi cultivada. Já a similaridade com os dados encontrados por Andrade Júnior et al. (2012) pode ser justificada pelos valores de DS, muito próximo em ambos casos, na mesma profundidade (0- 0,30 m), com média $\cong 1,50 \text{Mg m}^{-3}$, fazendo com que a PROD nestes dois trabalhos tenha sido também semelhante.

A normalidade dos dados não é pré-requisito fundamental para a realização de análises geoestatísticas (CAMBARDELLA et al., 1994). Todavia, é desejável que a distribuição dos dados não tenha caudas muito alongadas, para não comprometer a análise, principalmente as

estimativas da krigagem, que são baseadas em valores médios (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

O teste de Kolmogorov-Smirnov dos dados para os atributos físicos e da PROD indicou normalidade, exceto para a U (Tabela 2). Desta forma, as informações geradas pela análise exploratória foram de distribuição suficientemente simétrica para utilização de análises geoestatísticas e maior exatidão das estimativas de krigagem por meio de seus valores médios.

A média e mediana dos dados dos atributos físicos foram semelhantes, caracterizando tendência de simetria (Tabela 2). Para a PROD houve distanciamento entre média e mediana, no entanto, segundo Guimarães et al. (2010), isso não caracteriza afastamento expressivo da normalidade, apenas evidencia que, na natureza, não são encontradas distribuições absolutamente normais. Os dados de curtose e assimetria foram positivos e negativos, mas não houve afastamento expressivo do valor central zero, com exceção da PROD (Tabela 2).

O teste de Kolmogorov-Smirnov não indicou normalidade para os dados de U, porém a média e a mediana foram semelhantes, indicando simetria, constatada pelos valores positivos e pouco distantes de zero da curtose e assimetria, sugerindo que a cauda dos dados de U não foi alongada. Para a PROD o comportamento dos dados foi de pouca simetria e calda alongada, mas o teste de Kolmogorov-Smirnov indicou normalidade (Tabela 2).

3.3.2 Variabilidade estatística, geoestatística e suficiência amostral

Os dados dos atributos físicos (RP, U, MiP, PT, DS e a PROD) tiveram um coeficiente de variação (CV) entre baixo e moderado, segundo o critério de classificação de Warrick e Nielsen (1980) e tenderam a uma mesma tendência de variabilidade (Tabela 2). Os dados de U, PT, DS e PROD tiveram CV baixo, enquanto que os dados da RP e MiP tiveram CV moderado e somente os dados de MaP tiveram alta variabilidade, corroborando os resultados obtidos por Tavares et al. (2012), quando estudaram atributos físicos e mecânicos de Argissolo Amarelo, também sob cultivo de cana-de-açúcar.

Aquino et al. (2014) e Oliveira et al. (2015) também constataram alta variabilidade para dados de MaP, indicando que esse atributo físico pode ser influenciado por diferentes métodos de manejo do solo ou na determinação da suficiência amostral de solos coesos.

No entanto, de maneira geral observou-se que a ocorrência de variabilidade baixa ou moderada da maioria dos atributos físicos e da PROD, indicaram que as práticas de manejo que vêm sendo utilizadas na área do estudo não foram suficientes para provocar variações nesses atributos e nem na PROD.

O ajuste dos semivariogramas pela análise geoestatística evidenciou que os dados dos atributos físicos do solo e a PROD foram variáveis, indicando dependência espacial (DE) (Tabela 3). As técnicas geoestatísticas explicam com maior exatidão a variabilidade espacial quando comparadas ao CV, porque este caracteriza apenas a variação do conjunto de dados, enquanto as ferramentas geoestatísticas são técnicas que explicam a variação espacial dos dados pelo alcance e DE. Com isso, as estimativas de krigagem são mais exatas quando utilizados esses dois critérios para caracterizar a variabilidade espacial.

Tabela 3. Análise geoestatística, modelos de semivariograma e parâmetros estimados do semivariograma de atributos físicos de Argissolo Amarelo distrocoeso (0 – 0,30 m) e produtividade da cana-planta

Parâmetro	RP ¹	U ²	DS ³	PT ⁴	MaP ⁵	MiP ⁶	PROD ⁷
	(MPa)	(kg ¹ kg ⁻¹)	(Mg m ⁻³)		m ³ m ⁻³		(Mg ha ⁻¹)
Modelo	Exp ⁹	Esf ¹⁰	Esf	Exp	Esf	Esf	Exp
Efeito Pepita	0,06	2,2 x 10 ⁻⁵	3,4 x 10 ⁻³	3,8 x 10 ⁻⁴	1,2 x 10 ⁻³	5,1 x 10 ⁻⁴	0,08
Patamar	0,39	6,0 x 10 ⁻⁵	1,4 x 10 ⁻²	3,1 x 10 ⁻³	2,4 x 10 ⁻³	1,1 x 10 ⁻³	0,42
Alcance (m)	30,28	51,25	54,60	38,31	40,95	61,51	26,90
DE(%) ⁸	15,00	36,66	23,14	12,27	47,54	45,52	19,00
R ²	0,94	0,79	0,89	0,90	0,97	0,99	0,95
VC	0,90	0,87	0,78	0,89	0,91	0,79	0,89

¹RP: Resistência à penetração; ²U Umidade gravimétrica; ³DS: Densidade do solo; ⁴PT: Porosidade total; ⁵MaP: Macroporosidade; ⁶MiP: Microporosidade; ⁷PROD: Produtividade; ⁸DE: Dependência Espacial [DE = (Efeito Pepita/patamar) x 100]; (DE ≤ 25% é forte; 25 < DE < 75% é moderado e DE ≥ 75% é fraco); ⁹Modelo Exponencial; ¹⁰Modelo Esférico.

Os semivariogramas dos dados de U, MaP, MiP e DS ajustaram-se ao modelo esférico, conforme outros estudos (TAVARES et al., 2012; AQUINO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015). Entretanto, os dados de RP, PT e PROD ajustaram-se ao modelo exponencial (Tabela 3), constatando DE dessas variáveis, quando foram também considerados o efeito pepita e o patamar. Grimley e Vepraskas (2000) relataram que a produtividade pode ser estimada pelos atributos físicos do solo. Entretanto, especificamente diante dos dados obtidos no nosso estudo, somente os atributos RP e PT poderiam ser utilizados para estimar a PROD.

Avaliando o alcance dos semivariogramas individuais, foi possível observar que os dados dos atributos físicos do solo e da PROD estudados apresentaram variabilidade espacial dentro dos limites estabelecidos na malha amostral (56 m x 35 m) e se estabeleceram entre 26,9 e 54,6 m, exceto para MiP, que teve alcance de 61,51 m (Tabela 3). Portanto, a MiP variou pouco em distâncias pequenas e apresentou menor DE na área estudada.

A DE para os semivariogramas dos dados de U, MaP e MiP foi moderada, sendo classificada como forte para os dados de RP, PT, Ds e PROD (Tabela 3). Cambardella et al. (1994) relataram que as variáveis classificadas com forte DE são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, como por exemplo os fatores de formação; enquanto DE moderada e fraca é característica de solos mais homogêneos. Santos et al. (2012), estudando atributos físicos do solo em vale aluvial no semiárido de Pernambuco, constataram DE fraca e moderada, contrastando com os atributos físicos desse estudo. Essa diferença pode ser explicada pela grande variabilidade de solos que esses autores trabalharam, variando desde Neossolos Litólicos a Argissolos e uma área amostral bem maior que a do presente estudo.

O CV dos dados dos atributos físicos do solo e da PROD diferiu da DE para os semivariogramas calculados para esses dados. Os atributos físicos PT e DS e a PROD foram estimados com baixo CV; enquanto a RP com médio, porém a DE para essas variáveis foi forte (Tabelas 2 e 3). Se por um lado o manejo que vem sendo utilizado nesse solo não tem interferido na variabilidade dessas variáveis, como constatado pela estimativa do CV, por outro lado o caráter coeso do solo pode justificar a variabilidade em curtas distâncias, como constatado pela DE.

A densidade amostral mínima dos atributos físicos do solo e da PROD variou de 3 a 14 amostras por hectare, espaçadas entre 27 e 61 m (Tabela 4). A PROD foi a variável que teve uma maior estimativa de densidade amostral mínima, coerente com a DE forte (Tabela 3). Assim, a análise geoestatística estimou a necessidade de 14 amostras por hectare para que a PROD se torne representativa para a área em estudo.

Tabela 4 Densidade mínima de amostras baseada na densidade amostral do alcance de semivariogramas da análise estatística para atributos físicos de Argissolo Amarelo distrocoeso (0 – 0,30 m) e produtividade da cana planta

Variáveis	Densidade Amostral	Espaçamento
	Amostras ha ⁻¹	(m)
Resistência do solo à Penetração de raízes (RP)	11	30
Umidade gravimétrica (U)	4	51
Macroporosidade (MaP)	6	41
Microporosidade (MiP)	3	61
Porosidade Total (PT)	7	38
Densidade do Solo (DS)	3	55
Produtividade (PROD)	14	27
Coefficiente de Variação (%)	61,54	29,61

A estimativa de densidade amostral mínima para RP e PT foi de 11 e 7 amostras por hectare, respectivamente, sugerindo que a PROD variou em função desses atributos físicos, porque nos outros atributos a densidade amostral foi de apenas 3 amostras por hectare (Ds e MiP) e 4 amostras por hectare (U) (Tabela 4). A RP e PT também tiveram DE forte (Tabela 3) e os modelos exponenciais dos semivariogramas constataram uma DE na PROD, RP e PT (Tabela 3).

A baixa DE encontrada para MiP e a DS (3 amostras por hectare) e MaP (6 amostras por hectare) é justificada pela maior homogeneidade desses atributos sob o manejo adotado, confirmada pelos maiores alcances destes dados (Tabela 3).

As técnicas de densidade amostral são úteis no planejamento experimental e também como ferramentas nos programas de agricultura de precisão, porque o número de amostras coletadas está diretamente relacionado ao custo dos projetos, além de definirem o número ideal de pontos de coleta para que as variáveis avaliadas se tornem representativas da área onde estão sendo desenvolvidas as atividades agrícolas.

3.3.3 Correlações dos atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar

A DS se correlacionou negativamente com a PT ($r = -0,889^*$) e com a MaP ($r = -0,756^*$) e positivamente com a MiP ($r = 0,440^*$) (Tabela 5). O aumento da DS provocou diminuição da PT, principalmente devido à conversão de macroporos em microporos. Os poros de maior diâmetro (macroporos) são menos resistentes e deformam mais facilmente pelos processos de mecanização, rearranjando-se em poros de menor diâmetro (microporos), que são mais resistentes e suportam maiores pressões, conforme relataram por Beutler et al. (2006).

Tabela 5 Matrix de correlação de Pearson de atributos físicos de Argissolo Amarelo distrocoeso (0 – 0,30 m) e produtividade da cana-planta

Variables	RP ¹	U ²	MaP ³	MiP ⁴	PT ⁵	DS ⁶	PROD ⁷
RP	-	-0,208 ^{ns}	0,079 ^{ns}	-0,104 ^{ns}	0,037 ^{ns}	0,065 ^{ns}	0,094 ^{ns}
U	-0,208 ^{ns}	-	0,288 ^{ns}	-0,219 ^{ns}	0,222 ^{ns}	-0,143 ^{ns}	-0,360 [*]
MaP	0,079 ^{ns}	0,288 ^{ns}	-	-0,898 [*]	0,864 [*]	-0,739 [*]	0,012 ^{ns}
MiP	-0,104 ^{ns}	-0,219 ^{ns}	-0,898 [*]	-	-0,581 [*]	0,459 [*]	0,011 ^{ns}
PT	0,037 ^{ns}	0,222 ^{ns}	0,864 [*]	-0,581 [*]	-	-0,890 [*]	0,024 ^{ns}
DS	0,065 ^{ns}	-0,143 ^{ns}	-0,739 [*]	0,459 [*]	-0,890 [*]	-	0,098 ^{ns}
PROD	0,094 ^{ns}	-0,360 [*]	0,012 ^{ns}	0,011 ^{ns}	0,024 ^{ns}	0,098 ^{ns}	-

¹RP: Resistência do solo à penetração de raízes; ²U: Umidade gravimétrica; ³MaP: Macroporosidade; ⁴MiP: Microporosidade; ⁵PT: Porosidade total; ⁶DS: Densidade do solo; ⁷PROD: Produtividade; *Significativo à 0,05 de probabilidade; ^{ns}Não Significativo.

A PROD correlacionou-se inversamente com a U ($r = -0,360^*$), corroborando os resultados de Souza et al. (2008) e Pellin et al. (2015), que também constataram correlação inversa e significativa em estudos de variabilidade espacial entre essas variáveis. A cana-de-açúcar é muito dependente da umidade, conforme relataram Ball-Coelho et al. (1992) e Kanno et al. (1999), quando atribuíram a maior umidade na superfície do solo, como a principal responsável pela maior quantidade de raízes concentrada na camada superficial do solo.

No caso dos solos coesos, a maior umidade do solo pode contribuir para amenização da coesão, conforme relatado por Ramos et al. (2013). A RP pode ser minimizada pelo aumento da umidade, favorecendo aumentos de produtividade. Nesse tipo de solo, o cultivo de cana-de-açúcar em regime de sequeiro não é recomendado, porque a RP se acentua e compromete a produtividade da cultura. Portanto, o adensamento dos solos coesos pode ser bastante reduzido pela irrigação. Adicionalmente, a produtividade pode ser atribuída a outros fatores, como atributos químicos e/ou microbiológicos do solo.

3.3.4 Mapas de krigagem dos atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar

A krigagem é a superfície interpolada de cada variável, que mostra sua distribuição espacial. A partir da krigagem é possível identificar a localização e a abrangência dos valores extremos, o grau de homogeneidade da área e as direções de maior gradiente (GUIMARÃES et al., 2016).

Ao se utilizar mapas de otimização de amostragem, obtêm-se informações que possibilitam entender melhor o padrão de distribuição espacial e definir diferentes zonas de

manejo. Estes mapas podem ser de grande utilidade no planejamento experimental, e como ferramenta para os programas de agricultura de precisão (MONTANARI et al., 2005). Os mapas da distribuição espacial das variáveis estudadas devem ser apresentados em cinco intervalos regulares de valores específicos para cada variável, permitindo maior compreensão da distribuição, principalmente daquelas que apresentam pequenos intervalos entre os valores máximo e mínimo.

A maior variabilidade e PROD de cana-de-açúcar ocorreu no centro da área em estudo, apesar de ser a região de maior DS e MiP (Figura 3), caracterizando baixa correlação entre essas variáveis (Tabela 5). A PROD foi pouco expressiva nas margens, principalmente na margem direita.

A MaP e a MiP variaram inversamente em toda a extensão da área estudada e a PT foi consequência dessa variação. A DS foi expressiva no centro da área, estendendo-se sistematicamente no sentido longitudinal da área, como tendo sido influenciada por tráfego de máquinas.

A RP e a U variaram pouco, caracterizando a coesão existente nesse solo. Essa é uma característica natural desse tipo de solo, provavelmente resultante de processos pedogenéticos quando de sua formação.

Souza et al. (2004) e Montanari et al. (2005) relataram que a forma côncava do relevo pode influenciar atributos físicos do solo, principalmente a partir do depósito de sedimentos mais finos em regiões de baixada, causando modificações nesses atributos. Isto indica uma relação acentuada entre posição na paisagem e variabilidade nesses atributos num contexto de causa e consequência, inclusive em Argissolos coesos em áreas com pequena variação nas formas de relevo, como foi observado neste estudo.

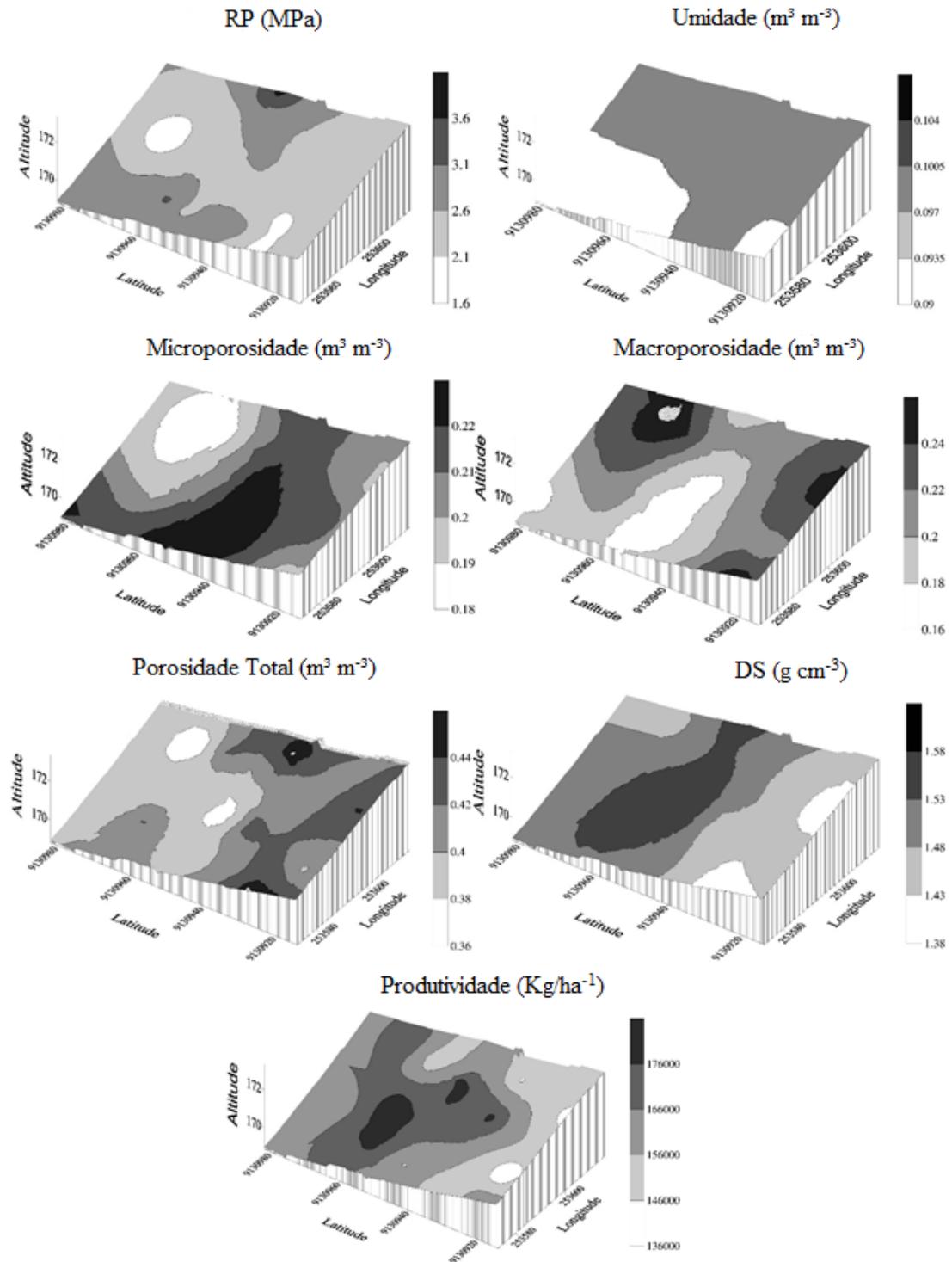


Figura 3 Mapas de Krigagem de atributos físicos de Argissolo Amarelo distrocoeso (0 – 0,30 m) e produtividade da cana-planta

3.4 Conclusões

1. Os atributos físicos resistência do solo à penetração de raízes, umidade gravimétrica, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, bem como a produtividade da cana-de-açúcar, apresentaram estrutura de dependência espacial, ajustando-se preferencialmente aos modelos matemáticos esférico e exponencial;
2. Os mapas de krigagem identificaram regiões homogêneas e heterogêneas na área de estudo, indicando que as técnicas geoestatísticas foram eficientes na sua caracterização geoespacial;
3. A densidade amostral mínima para estimar a produtividade da cana-de-açúcar em solo coeso foi de 14 amostras por hectare e dependeu da resistência do solo à penetração de raízes e da porosidade total do solo.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements** [internet]. Rome: FAO; 1998. [acesso em: 8 nov 2016]. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>.
- ALMEIDA, B.G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Piracicaba, 2008. 103p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.1, p.76-84, 2012.
- AQUINO, R.E.; CAMPOS, M.C.C.; MARQUES JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, I.A.; MANTOVANELI, B.C.; SOARES, M.D.R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.2, p.397-406, 2014.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. **Physical tests for monitoring soil quality**. In: DORAN, J.W. e JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p. 123-141.
- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.142, n.2, p.297-305, 1992.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.5, p.787-794, 2006.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v.43, n.3-4, p.205-217, 1997.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C.; AQUINO, R.E.; OLIVEIRA, I.A.; BERGAMIN, 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**, Recife, v.8, n.2, p.305-310, 2013.

CARVALHO, A.L.; ANTUNES, C.H.; FREIRE, F. Economic-energy-environment analysis of prospective sugarcane bioethanol production in Brazil. **Applied Energy**, London, v.181, p.514-526, 2016.

CARVALHO, G.J.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S.; MARTINS, M.V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.765-771, 2006.

CAVALCANTE, E.G.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.3, p.237-243, 2011.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/17 [internet]. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; 2016 [acesso em: 8 nov 2016]. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_18_14_27_15_boletim_cana_p_ortugues_-_1o_lev_-_16.pdf.

CPRM. **Serviço Geológico do Brasil. Geologia e recursos minerais do estado de Pernambuco**. Recife, 2001, CD-ROM.

DANE J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods**. Madison: American Society of Agronomy (Soil Science Society of America Book Series, 5). 2002. 1692 p.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York, John Wiley, 1991. p. 324-339.
DANTAS NETO, J.; FIGUEIREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n. 2, p.283-288, 2006.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. **Pressure plate extractor**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.) SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 688-690). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FARIAS, I.L.; PACHECO, E.P.; VIÉGAS, P.R.A. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas-Brasil. **Ciência Agronomica**, Fortaleza, v.44, n.4 p.669-675, 2013.

FISHER, R.A. **Statistical Methods, Experimental Design, and Scientific Inference**. Oxford University Press: New York, 1990.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. **Particle density**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 229-240). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002a.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. **Porosity**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 241-254). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002b.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P.; PERES, F.S.C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II - Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.805-818, 2009.

GEE, G.W.; OR, D. **Particle size analysis**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 255-293). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

GHELLER, A.C.A.; MENEZES, L.L.; MATSUOKA, S.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H.P.; ARIZONO, H.; GARCIA, A.A.F. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. 1 ed. Araras-SP: UFSCAR, 1999.

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

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

GRIMLEY, D.A.; VEPRASKAS, M.J. Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.64, n.6, p.2174-80, 2000.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. **The solid phase**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 201-415). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

GUIMARÃES, R.M.L.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; BLAINSKI, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.30, n.4, p.657-669, 2010.

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

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

KANNO, T.; MACEDO, M.C.; EUCLIDES, V.P.B.; BONO, J.A.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G.; ROCHA, M.C.; BERETTA, L.G.R. Root biomass of five tropical grass pastures under continuous grazing in Brazilian savanas. **Grass and Forage Science**, Tochigi, v.41, n.1, p.9-14, 1999.

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

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.217-223, 2006.

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; JACOMINE, P.T.K.; ROMERO, R.E.; LIBARDI, P.L. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.467-476, 2004.

LLANILLO, R.F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO J.; GUIMARÃES, M.F.; FERREIRA, R.R.M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.27, n.2, p.205-220, 2006.

MELO, D.V.M.; ALMEIDA, B.G.; SOUZA, E.R.; SILVA, L.S.; JACOMINE, P.K.T. Structural quality of polyacrylamide-treated cohesive soils in the coastal tablelands of Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.2, p.476-485, 2014.

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

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.1, p.69-77, 2005.

NEAMHOM, T.; POLPRASERT, C.; ENGLANDE, J.R.A.J. Ways that sugarcane industry can help reduce carbon emissions in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v.131, n.2, p.561-571, 2016.

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

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

PELLIN, D.M.P.; MONTANARI, R.; LIMA, E.S.; LOVERA, L.H.; CORRÊA, A.R. Variabilidade de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.28, n.1, p.28-38, 2015.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RAMOS, M.R.; CURCIO, G.R.; DEDECEK, R.A.; MELO, V.F.; UHLMANN, A. Influência da posição na encosta na manifestação do caráter coeso em solos da formação Macacu, no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p.837-845, 2013.

RENOUF, M.A.; WEGENER, M.K.; NIELSEN, L.K. An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. **Biomass Bioenergy**, New York, v.32, n.12, p.1144-1155, 2008.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. **Constant head well permeameter (vadose zone)**. In J. H. Dane e G. C. Topp (Eds.). SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 844-858). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

ROBERTSON, G.P. **GS⁺ geostatistics for the environmental sciences: GS⁺ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. **Suction table**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp.692-698). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Rio de Janeiro:Embrapa Solos, 2013.

SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; ALMEIDA, B.G.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANDRADE, T.S.; FONTES JÚNIOR, R.V.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos do vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.8, p.828-835, 2012.

SILVA, A.R.; SILVA, L.L.; FRAZÃO, J.J.; SALGADO, F.H.M.; SILVA, M.C.; CORRECHEL, V. Resistência mecânica à penetração do solo com diferentes coberturas vegetais sob sistema. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, v.22, n.2, p.158-164, 2012.

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

SILVA, E.N.S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A.R.; CORREA, A.R.; TOMAZ, P.K.; FERRAUDO, A.S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.2, p.598-607, 2015a.

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**, Campina Grande, v.18, n.3, p.241-249, 2014.

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

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 Ciências Agrárias**, Belém, v.59, n.1, p.9-15, 2016.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington: Soil Conservation Service - United States Department of Agriculture, 1998.

SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; MAGALHÃES, P.G.; CAMPOS, M.C.C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, São Cristóvão, v.8, n.1, p.183-190, 2008.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.5, p.491-499, 2004.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; URLANI NETO, V.L. **Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar - Stolf**. São Paulo: Planalsucar, 1983.

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

TOPP, G. C.; FERRÉ, P. A. **Water content**. In J. H. Dane e G. C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp.417-446). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Madison, v.38, n.1, p.45-93, 1985.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.E.; BIGGAR, J.W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. 1 ed. New York, 1980. p. 319-344.

ZUFFO, V.J.; PIRES, F.R.; BONOMO, R.; VITÓRIA, E.L.; CELIN FILHO, A.; SANTOS, E.O.J. Effects of tillage systems on physical properties of a cohesive yellow argisol in the northern state of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1372-1382, 2013.

4 CAPÍTULO II – CONDIÇÃO ESTRUTURAL E ATRIBUTOS FÍSICOS EM ARGISSOLO COESO SOB SISTEMAS DE MANEJO E DOSES DE GESSO

Resumo

O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos da gessagem aplicada superficialmente e incorporada com gradagem + subsolagem na estrutura, nos atributos físicos e nos teores de Cálcio em um Argissolo Amarelo distrocoeso. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso em esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos nas parcelas principais foram com preparo mecanizado (gradagem + subsolagem) e a ausência de preparo do solo. Nas subparcelas as doses de gesso aplicadas foram 1; 2 e 4 t ha⁻¹ mais o controle (ausência de gesso), aplicadas em superfície à lâncõ antes do preparo do solo. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-0,30 m e 0,30-0,60 m entre os sulcos de plantio. Foram avaliados a resistência tênsil dos agregados, diâmetro médio ponderado, resistência do solo à penetração de raízes, umidade gravimétrica, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e teor de cálcio no solo. As doses de gesso, no manejo com gradagem e subsolagem, reduziram a resistência tênsil dos agregados do solo. Entre os atributos físicos do solo a sua resistência à penetração foi influenciada pelo preparo do solo, com menores valores nas parcelas mecanizadas. O preparo do solo com subsolagem foi eficiente em aumentar os teores de gesso em profundidade.

Palavras-chave: Resistência tênsil. Resistência à penetração. Gessagem. Cana-de-açúcar.

CHAPTER II - STRUCTURAL CONDITION AND PHYSICAL ATTRIBUTES IN ULTISOL COHESIVE UNDER MANAGEMENT SYSTEMS AND GYPSUM DOSES

Abstract

The objective of the present work was to evaluate the effects of surface applied and embedded harrow + subsoiling on the structure, on the physical attributes and on the calcium content in a dystrocohesive Yellow Argisol. The experiment was carried out in a randomized complete block design with four replications, totaling 32 experimental units. The treatments in the main plots were with mechanized preparation with harrow + subsoiling and the absence of preparation of the soil. In the subplots the doses of gypsum applied were 1; 2 and 4 t ha⁻¹ plus the control (absence of gypsum), applied on surface to the haul before preparation of the soil. The samples were collected at depths of 0-0.3m and 0.3-0.6m between the planting furrows. Tensile strength of the aggregates, weighted average diameter, soil resistance to root penetration, moisture, bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity and soil calcium content were evaluated. Gypsum doses reduced the tensile strength of soil aggregates. Among the soil physical attributes soil resistance to penetration was influenced by soil preparation with lower values in the mechanized plots. Soil preparation with subsoiling was efficient in increasing gypsum contents in depth.

Keywords: Tensile strength. Penetration resistance of soil. Gypsum. Sugarcane.

4.1 Introdução

Durante a 21^a Conferência das Partes da Organização (COP 21) das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, o Brasil se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% em 2030, equivalente a uma produção de 50 bilhões de litros de etanol (COP 21, 2015). Atualmente, o Brasil é o maior produtor de etanol e tem uma produção estimada em 27,5 bilhões de litros (CONAB, 2016). O cultivo irrigado de cana-de-açúcar pode contribuir para que o país consiga atingir a meta fixada em Paris.

A produção desse biocombustível no nordeste do Brasil é uma atividade industrial importante, que gera muitos empregos nas áreas rurais e industriais, proporcionando grande contribuição social ao país (SIMÕES NETO et al., 2012). Entretanto, grande parte das áreas canavieiras do nordeste estão sob domínio de solos distróficos coesos, principalmente os Argissolos Amarelos, correspondentes a classe do Ultisol (SOIL SURVEY STAFF, 1993), que são morfologicamente uniformes, mas com elevada variação granulométrica nos sedimentos do material de origem (CPRM, 2001).

Apesar da importância da cana-de-açúcar no contexto estadual, a produtividade pernambucana é inferior a média nacional, ficando abaixo dos seis principais produtores nacionais. As principais causas da menor produtividade podem ser apontadas como a menor pluviosidade e o empobrecimento dos solos (OLIVEIRA et al., 2011).

Esses solos apresentam-se dessaturados de bases, ácidos, com pH em água entre 4,0 e 5,0, e, normalmente, atingem valores elevados de alumínio trocável (GIAROLA; SILVA, 2002). Portanto, para melhor rendimento das culturas agrícolas faz-se necessário adoção de corretivos como a calagem e a gessagem visando uma melhor distribuição radicular e, conseqüentemente, produtividade das culturas.

Em subsuperfície a correção do solo pode ser feita com incorporação do calcário ou por meio da gessagem. A correção da acidez em profundidade geralmente é realizada por meio da gessagem e apresenta resultados positivos com relação aos atributos químicos do solo. Contudo, a aplicação de gesso à lanço pode ter efeitos benéficos também nos atributos físicos do solo, devido sua habilidade em flocular partículas do solo, aumentando a porosidade e reduzindo a densidade do solo, fornecendo melhor condição física para a absorção de nutrientes do solo (ANIKWE et al., 2016).

Embora a gessagem seja eficiente para a correção do solo em subsuperfície, a hipótese do presente trabalho é que a gessagem em Argissolos coesos tem sua eficiência aumentada

quando o solo é subsolado, porém essas práticas de manejo podem modificar a agregação do solo e seus atributos físicos.

Fisicamente, os solos coesos apresentam valores maiores de resistência tênsil e densidade do solo e menores valores de porosidade total, acompanhado de redução de macroporos (LIMA et al., 2004). Um dos indicadores mais sensíveis para identificação dos solos coesos é a resistência mecânica à penetração de raízes, que neste caso apresentam valores elevados, geralmente superiores a 2,0 MPa (SANTANA et al., 2006), considerado como limite crítico, podendo restringir o crescimento radicular das culturas (TORMENA et al., 1998; BLAINSKI et al., 2008).

Assim, a intervenção mecânica do solo normalmente é utilizada em áreas canavieiras, como gradagem e subsolagem, visando reduzir a resistência do solo à penetração de raízes e densidade do solo, aumentando a porosidade total e macroporosidade.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos da gessagem aplicada superficialmente e incorporada com gradagem + subsolagem na estrutura do solo, nos seus atributos físicos, bem como nos teores de cálcio no solo.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina – PE, nas coordenadas 7°51'13"S e 35°14'10"W, no período entre junho de 2014 e outubro de 2015, durante o primeiro ciclo de cultivo de cana-de-açúcar (RB867515).

O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo Ams, tropical chuvoso de monção, com verão seco e a altitude do município é de 180 m. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), correspondente ao Ultisol (SOIL SURVEY STAFF, 1998). Características físicas e químicas encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos nas camadas superficial e subsuperficial do Argissolo Amarelo distrocoeso utilizado no experimento

Parâmetro	0-0,30 m	0,30-0,60 m
pH (H ₂ O)	4,60	4,40
H+Al (cmolc dm ⁻³)	4,40	7,55
Al ⁽¹⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,50	1,15
H ⁽²⁾ (cmolc dm ⁻³)	3,90	6,40
Ca ⁽¹⁾ (cmolc dm ⁻³)	1,30	0,95
Mg ⁽¹⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,30	0,20
K ⁽³⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,10	0,03
Na ⁽³⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,03	0,02
CTC _{efetiva} (cmolc dm ⁻³)	2,23	2,35
CTC _{potencial} (cmolc dm ⁻³)	6,13	8,75
V (%)	28,21	13,76
m (%)	22,44	48,85
Carbono orgânico total (%)	0,96	0,77
Matéria orgânica (%)	1,66	1,33
P ⁽³⁾ (mg dm ⁻³)	9,00	2,10
Areia Total (g kg ⁻¹)	656,50	630,85
Areia Fina (g kg ⁻¹)	168,20	180,00
Areia Grossa (g kg ⁻¹)	488,30	450,85
Silte (g kg ⁻¹)	91,00	45,95
Argila (g kg ⁻¹)	252,50	323,2
Classe textural	Fr-Arg-Ar	Fr-Arg-Ar
Grau de Flocculação (%)	14,85	12,55
Grau de Dispersão (%)	85,15	87,45
Densidade de partículas (Mg m ⁻³)	2,61	2,40
Densidade do Solo (Mg m ⁻³)	1,55	1,34
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	0,41	0,48
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,14	0,19
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,27	0,29
Capacidade de Campo (m ³ m ⁻³)	0,24	0,26
Ponto de Murcha Permanente (m ³ m ⁻³)	0,17	0,18
Condutividade hidráulica saturada (mm h ⁻¹)	69,92	90,04

¹CTC_{efetiva}: Capacidade de troca catiônica efetiva; ²CTC_{potencial}: Capacidade de troca catiônica potencial; ³V: Saturação de bases; ⁴m: Saturação por alumínio; Fr-Arg-Ar : Franco-Argilo-Arenosa

Fisicamente o solo foi caracterizado seguindo-se metodologia preconizada por Dane e Topp (2002), resumidamente comentada a seguir.

Na análise granulométrica, para definir a distribuição de partículas sólidas por tamanho (areia, silte e argila) e classe textural do solo, foi utilizado o método do densímetro, segundo Gee e Or (2002), com adaptações conforme comentadas em Almeida (2008), onde a leitura da fração argila é realizada após 24h, a areia é obtida por peneiramento, e o silte calculado por diferença [$\text{silte}_{\%} = (\text{areia}_{\%} + \text{argila total}_{\%}) - 100$]. Com os dados das argilas total e dispersa em água, calculou-se o grau de floculação (GF) e o grau de dispersão (GD).

A densidade das partículas sólidas do solo (DP) foi obtida pelo método do picnômetro (FLINT; FLINT, 2002a); e a densidade do solo (DS), pelo método do anel volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

A porosidade total (PT) foi determinada de acordo com Flint e Flint (2002b). A macroporosidade (MaP) foi calculada usando os dados da PT e MiP ($\text{MaP} = \text{PT} - \text{MiP}$). A microporosidade (MiP) e umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) foram obtidas usando a Mesa de Tensão (ROMANO et al., 2002); sendo a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) determinada via Câmara de Richards (DANE; HOPMANS, 2002).

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi obtida pelo método do permeâmetro de carga constante, por meio da aplicação da equação de Darcy, segundo metodologia sugerida em Reynolds e Elrick (2002).

A caracterização química foi realizada de acordo com metodologias sugeridas em Donagema et al. (2011). Desse modo, o pH foi determinado na relação 1:2,5 (solo:H₂O); Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos com KCl 1,0 mol L⁻¹ e dosados por titulometria. P, K⁺, Na⁺, Fe, Cu, Zn e Mn foram extraídos com Mehlich-1, sendo o P dosado por espectrofotometria, o K⁺ e Na⁺ por fotometria de chama; e o Fe, Cu, Zn e Mn por espectrofotometria de absorção atômica. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ e dosada por titulometria. O carbono orgânico total (COT) foi determinado por combustão úmida pelo dicromato de potássio e dosado por titulometria. Com os resultados dessas análises químicas, calculou-se a saturação por bases (V), a saturação por Al (m), a capacidade de troca de cátions efetiva ($\text{CTC}_{\text{efetiva}}$) e a capacidade de troca de cátions potencial ($\text{CTC}_{\text{potencial}}$).

4.2.2 Manejo do cultivo da cana-de-açúcar

A área agrícola utilizada antes da montagem do experimento foi cultivada por 50 anos com cultivo convencional de cana-de-açúcar e foi preparada para implantação do experimento em junho de 2014. O manejo para renovação do canavial consistiu na dessecação da socaria do cultivo anterior, utilizando o herbicida Glyfosate® na dosagem de 4,0 L ha⁻¹.

A correção do solo consistiu na aplicação de 3,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de 79,3% (33,6% CaO e 17,8% MgO). A necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases, com o objetivo de elevar a V para 60% da CTC_{potencial} do solo (RAIJ et al., 1997). O calcário foi aplicado à lanço em superfície e incorporado até 0,30 m de profundidade.

Após a abertura dos sulcos (60 dias após a aplicação de calcário), o plantio foi realizado manualmente no mês de Agosto de 2014, utilizando-se rebolos de três gemas, distribuídos em sulcos com oito metros de comprimento, para que se atingisse uma densidade de plantio de 16 a 18 gemas por metro linear.

Na adubação de plantio foi aplicado no fundo do sulco 500 kg ha⁻¹ da formulação 12-24-18 e as fontes de N, P e K utilizadas foram sulfato de amônio + ureia, fosfato monoamônio e cloreto de potássio, respectivamente.

O cultivo da cana-de-açúcar foi conduzido sob irrigação plena. Utilizaram-se aspersores com dois bocais (4,0 x 2,8 mm) e vazão nominal de 1,29 m³ h⁻¹, dispostos em campo num espaçamento de 12 x 12 m. Foram realizadas irrigações a cada dois dias, sendo a lâmina de irrigação calculada pelo somatório da evapotranspiração da cultura (Etc), descontando-se as eventuais precipitações pluviais no período. A evapotranspiração da cultura foi calculada com base no produto do coeficiente da cultura (Kc) pela evapotranspiração de referência (Etr), estimada pela evaporação do Tanque Classe A, de acordo com Allen et al. (1998). A lâmina total de irrigação aplicada foi de 786 mm e a precipitação pluvial foi de 1.029 mm (Figura 1).

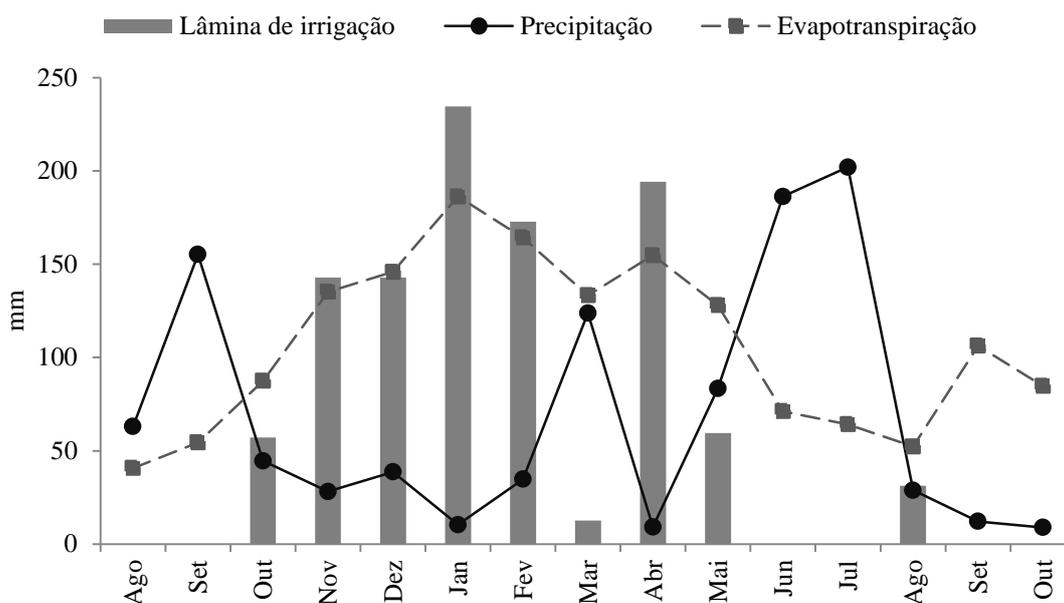


Figura 1. Precipitação, evapotranspiração e lâmina de irrigação durante o ciclo da cana-de-açúcar na área do experimento na EECAC.

4.2.3 Delineamento experimental e tratamentos adotados

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos nas parcelas principais foram com preparo mecanizado com gradagem + subsolagem (CP) do solo e a ausência de preparo (SP).

O sistema com preparo do solo foi realizado por meio de subsolagem, com cinco passadas em cada parcela a uma profundidade de 0,50 m e, posteriormente, três passadas da grade intermediária (discos de 24'') até a profundidade de 0,20 m.

No sistema sem preparo do solo foi realizada apenas a sulcagem direta, com 0,30 m de profundidade. Nas subparcelas, os tratamentos foram o controle mais três doses de gesso (20% de Ca e 16% de S). As doses de gesso foram 1; 2 e 4 t ha⁻¹ (respectivamente: G1; G2 e G4), mais o controle (ausência de gesso, G0), aplicadas em superfície à lanço antes do preparo do solo.

As parcelas experimentais tinham área total de 56 m², constituídas por 7 linhas de cultivo, com espaçamento de 1,0 m entre sulcos e 8 m de comprimento. A área útil da parcela foi considerada como as três fileiras centrais e 6 m de comprimento, desprezando-se dois sulcos de cada lado das parcelas e 1 m de cada lado das cabeceiras dos sulcos como bordadura, totalizando uma área útil com 18 m².

4.2.4 Análises físicas

Foram coletadas nove amostras não deformadas por parcela no final do ciclo da cana-planta (Novembro de 2015), utilizando-se anéis volumétricos (aço inoxidável, volume $\cong 10^{-4} \text{m}^3$) nas profundidades de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, nas entrelinhas de plantio.

Também foram coletadas cinco amostras deformadas simples, com auxílio de trado (holandês), amostradas em formato de “x” por parcela, para constituir uma amostra composta. Essas amostras deformadas foram utilizadas para avaliação da análise granulométrica e do teor de cálcio do solo, nas mesmas profundidades.

A análise granulométrica dos solos foi realizada pelo método do densímetro, segundo Gee e Or (2002), com adaptações conforme comentadas em Almeida (2008), onde se utilizou o dispersante químico (NaOH a 1 mol L^{-1}), e após agitação lenta (50 rpm em agitador tipo Wagner, por 16h) a areia total foi obtida por peneiramento úmido (0,053 mm), sendo a leitura da densidade da suspensão (de argila + dispersante) realizada por densímetro de Bouyoucos (modelo nº 152 H), após o tempo para sedimentação do silte (padronizado para 24 h). As frações de areia (grossa e fina) foram separadas por tamisação via seco. A fração silte foi obtida por diferença [silte_% = (areia_% + argila total_%) – 100].

A caracterização dos agregados do solo foi determinada conforme sugerem Nimmo e Perkins (2002), que descrevem a metodologia proposta por Kemper e Chepil (1965), pelo método via úmida, com modificações comentadas a seguir.

O aparelho de Yoder (1936) foi utilizado para agitação dos conjuntos de peneiras, na oscilação de 26 ciclos/min (movimento vertical com amplitude de 0,05m, por 10 min). O equipamento utilizado é composto por três recipientes cilíndrico, com um conjunto de cinco jogos de peneiras/cilindro (2,00 - 1,00 - 0,50 - 0,25 - 0,125 mm).

Foram utilizados agregados com diâmetro médio de 5,93 mm (passados em peneira de 7,1 mm de malha e retidos na de 4,76 mm). Separam-se duas subamostras de 50 g desses agregados, sendo uma utilizada no peneiramento por via úmida, e outra para determinação do fator de correção de umidade (fator “f”), corrigindo-se os pesos dos agregados secos ao ar para secos em estufa. Após secagem ao ar, para reduzir o efeito da umidade antecedente, os agregados foram pré-umedecidos por capilaridade durante 15 minutos, com álcool, objetivando a eliminação do ar aprisionado no seu interior, evitando o aumento brusco de pressão interna durante o peneiramento, que provocaria sua ruptura, mascarando a real estabilidade dos referidos agregados.

A distribuição dos agregados por classe de diâmetro, conforme Nimmo e Perkins (2002) foi expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP), por meio da equação (1):

$$DMP = \sum_{i=1}^n (X_i, W_i) \quad (1)$$

em que: X_i – é o diâmetro médio das classes (mm); W_i – é a proporção de cada classe em relação ao total.

No processo analítico, foi desconsiderado a fração da amostra cujo diâmetro apresentasse mais de 2 mm (cascalho), por não estar diretamente envolvida no processo de agregação.

Para os ensaios da resistência tênsil dos agregados (RT), o diâmetro médio usado foi obtido por peneiramento à seco, utilizando-se peneiras com abertura de malha entre 19,0 e 25,4 mm, conforme Imhoff et al. (2002). Nos ensaios de tensão indireta para determinação RT utilizou-se um atuador eletrônico linear com velocidade constante de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$. Antes da medida, cada agregado foi pesado e, em seguida, colocado na sua posição mais estável para a aplicação da carga. Foi utilizado um penetrômetro de bancada, onde o valor de carga aplicada para a ruptura do agregado é registrado por um sistema eletrônico de aquisição de dados. Após cada ensaio, os agregados de cada amostra foram levados à estufa (105°C , 24h) para determinação da umidade gravimétrica do solo (TOPP; FERRÉ, 2002).

A resistência tênsil (RT, em kPa) foi calculada, conforme Dexter e Kroesbergen (1985), pelo uso da equação (3):

$$RT = 0,576 \left(\frac{F}{D_e^2} \right) \quad (3)$$

em que: 0,576 é o valor da constante de proporcionalidade da relação entre a força compressiva aplicada e a resistência tênsil gerada no interior do agregado; F é a força máxima aplicada para ruptura do agregado (N), e D_e é o diâmetro efetivo (m). O D_e foi calculado conforme sugerido em Watts e Dexter (1998), usando a equação (4):

$$D_e = D_m \left(\frac{M}{M_0} \right)^{1/3} \quad (4)$$

sendo: D_m o diâmetro médio do agregado (m), obtido pela média aritmética das malhas das peneiras usadas na sua separação, neste caso, 0,0222 m [(0,019+0,0254)/2]; M é a massa do agregado individual (g); e M_0 é a massa média dos agregados (g).

Para a avaliação da resistência do solo à penetração de raízes (RP) *in situ* foi utilizado um penetrômetro digital FALKER®, modelo PenetroLOG – PLG 5300 com haste metálica com extremidade em cone tipo: C2 com 12,2 mm de diâmetro. O penetrômetro registrou e armazenou leituras a cada 0,01 m de profundidade, coletando-se os dados até a profundidade

de 0,60 m. Os dados foram extraídos por meio do Software PenetroLOG. Foram realizadas nove leituras sequenciais em cada parcela.

Os dados da RP foram correlacionados aos da U, sendo estas determinadas nas mesmas camadas de obtenção da RP (0,0-0,60 m), a partir da relação entre a massa de solo úmido e massa de solo seco em estufa a 105 °C (Topp e Ferré, 2002).

A PT do solo foi determinada usando o método de umidade volumétrica de saturação, sendo calculada pela relação entre o volume de poros saturados e volume de solo (FLINT; FLINT, 2002b). A MaP foi obtida a partir do equilíbrio do conjunto anel-solo, entre o peso do solo saturado (0 kPa) e aplicação da tensão de 6 kPa. A MiP foi obtida após subtração do peso do conjunto anel-solo equilibrados à 6 kPa e o seu respectivo peso seco em estufa a 105 °C. Para os equilíbrios das tensões usadas em MaP e MiP foi utilizada a mesa de tensão conforme sugerido em Romano et al. (2002). A DS foi determinada pelo método do anel volumétrico (aço inoxidável, $\cong 10^{-4} \text{ m}^3$), a partir da relação entre a massa de sólidos contida no seu interior (seca em estufa a 105 °C) e o volume do anel volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

Com relação aos dados de química do solo, foram avaliados os teores trocáveis de Ca^{2+} , extraído em $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$, e determinado por espectrofotometria de absorção atômica (Donagema et al., 2011).

4.2.5 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliação da normalidade. A RT e a RP na camada com profundidade de 0,30-0,60 m não apresentaram normalidade e foram transformados em raiz quadrada.

Os dados que apresentaram normalidade, e os transformados, tiveram seus resultados analisados aplicando o teste F (ANOVA) para o preparo do solo e, quando ocorreram diferenças significativas, as comparações das médias dos tratamentos foram realizadas por meio do teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Dentro de cada preparo, para avaliar as doses de gesso foi aplicado o teste de regressão.

4.3 Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta o resumo da análise de variância para os atributos físicos do solo e teores de Ca nas camadas de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, onde não foram observadas diferenças

significativas ($p > 0,05$) entre o preparo do solo para os indicadores físicos de agregação, como RT e DMP na camada de 0-0,30 m.

O teor de água dos agregados no momento da medida de RT foi de $0,012 \text{ kg kg}^{-1}$ ($\pm 0,0001$) e não foi significativamente alterado pelos tratamentos, indicando que a variação da RT entre os tratamentos deve-se aos efeitos destes na estrutura do solo.

A RT apresentou elevados valores de CV na camada superficial, quando não houve transformação dos dados. Esses dados de CV estão próximos aos encontrados por Tormena et al. (2008), que verificaram 44% de CV para essa variável.

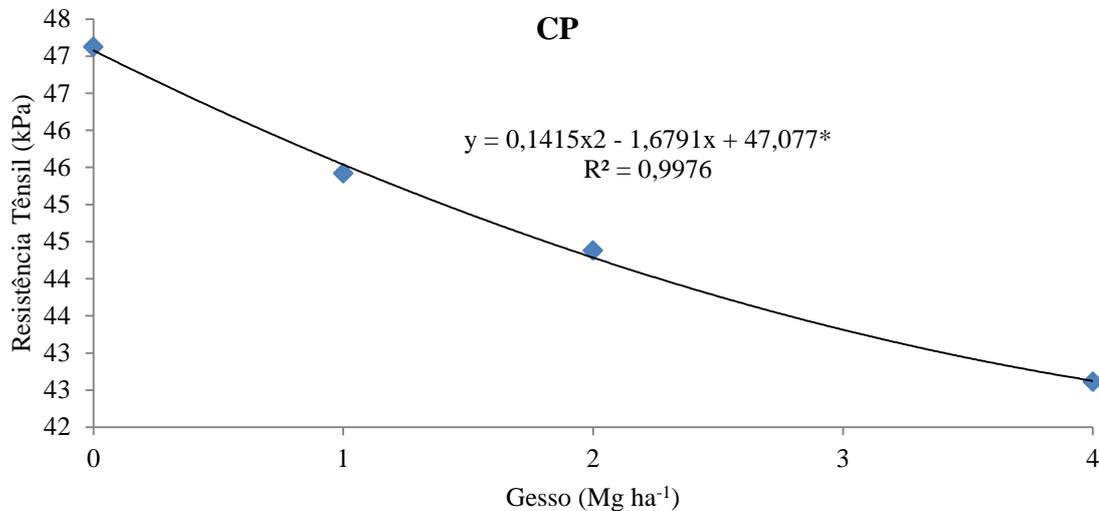
Além da umidade, outro fator que também influencia na RT é a forma dos agregados (IMHOFF et al., 2002; TORMENA et al., 2008). Assim, no presente estudo, por ser um solo com caráter coeso, isso possivelmente dificultou o preparo de agregados mais uniformes, o que pode ter induzido a uma alta variabilidade dos dados.

Na camada superficial observou-se regressão quadrática significativa para a RT no manejo com preparo do solo (Figura 2). Esses resultados indicam que a aplicação de gesso associada ao preparo do solo tende a reduzir os valores de RT.

Tabela 2. Resumo da análise de variância de atributos físicos e teor de cálcio no solo nas camadas estudadas

FV	GL	RT (kPa)	DMP (mm)	RP (MPa)	θ (kg kg ⁻¹)	DS (Mg ha ⁻¹)	PT _____	MaP m ³ m ⁻³ _____	MiP _____	Ca (cmol _c dm ⁻³)
Camada de 0-0,30 m										
Bloco	3	1,242 ^{ns}	0,132 ^{ns}	0,960 ^{ns}	2,791 ^{ns}	2,181 ^{ns}	0,977 ^{ns}	0,902 ^{ns}	7,465 ^{ns}	0,923 ^{ns}
Preparo (P)	1	0,004 ^{ns}	0,000 ^{ns}	16,621 [*]	0,183 ^{ns}	9,575 ^{ns}	3,843 ^{ns}	2,760 ^{ns}	0,159 ^{ns}	0,119 ^{ns}
Resíduo 1	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gesso (G)	3	0,034 ^{ns}	2,040 ^{ns}	0,423 ^{ns}	2,457 ^{ns}	8,861 [*]	8,553 [*]	5,551 [*]	0,640 ^{ns}	3,918 [*]
G X P	3	0,284 ^{ns}	0,494 ^{ns}	2,446 ^{ns}	1,619 ^{ns}	0,699 ^{ns}	0,445 ^{ns}	0,944 ^{ns}	1,515 ^{ns}	1,601 ^{ns}
Resíduo 2	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CV P (%)		31,87	12,08	18,71	6,91	4,87	9,01	27,26	5,22	25,86
CV G (%)		44,00	10,27	16,42	7,31	3,02	4,6	18,28	5,45	23,13
Média geral		44,05	2,74	2,70	0,1	1,49	0,43	0,15	0,27	1,21
Camada de 0,30-0,60 m										
Bloco	3	0,417 ^{ns}	0,146 ^{ns}	4,204 ^{ns}	2,243 ^{ns}	7,344 ^{ns}	6,605 ^{ns}	9,511 [*]	2,682 ^{ns}	0,484 ^{ns}
Preparo (P)	1	0,389 ^{ns}	1,532 ^{ns}	29,667 [*]	0,634 ^{ns}	2,078 ^{ns}	0,924 ^{ns}	4,042 ^{ns}	0,096 ^{ns}	12,397 [*]
Resíduo 1	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gesso (G)	3	1,136 ^{ns}	1,747 ^{ns}	0,621 ^{ns}	1,492 ^{ns}	0,909 ^{ns}	0,845 ^{ns}	0,558 ^{ns}	1,576 ^{ns}	3,674 [*]
G X P	3	1,795 ^{ns}	0,101 ^{ns}	0,857 ^{ns}	0,628 ^{ns}	0,172 ^{ns}	0,481 ^{ns}	0,547 ^{ns}	0,472 ^{ns}	6,621 ^{ns}
Resíduo 2	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Total	31	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CV P (%)		18,2	7,17	3,01	9,45	5,44	6,62	10,15	9,12	18,68
CV G (%)		21,56	11,87	9,87	8,66	6,01	6,28	17,67	3,84	36,32
Média geral		41,08	2,70	2,18	0,13	1,34	0,48	0,19	0,29	0,54

FV = Fonte de variação; GL = Grau de liberdade; QM = Quadrado médio; CV = coeficiente de variação; RT = Resistência tênsil dos agregados; DMP = Diâmetro médio ponderado; RP = Resistência do solo à penetração de raízes; DS = Densidade do solo; PT = Porosidade total; MaP = Macroporosidade; MiP = Microporosidade; Ca = Cálcio, *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ^{ns}Não significativo.

**Figura 2.** Regressão da resistência tênsil dos agregados em função das doses de gesso nos manejos com preparo (CP) e sem preparo do solo (SP) na profundidade de 0-0,30 m

De acordo com Anikwe et al. (2016) diferenças significativas com a aplicação de gesso podem ser atribuídas à capacidade do Ca^{2+} , quando aplicado por meio do gesso, em floccular as partículas do solo, criando assim uma condição física do solo favorável à absorção de nutrientes.

Com relação a estabilidade dos agregados, avaliada pelo DMP, pode-se observar que seus valores não foram significativamente afetados pelo preparo, nem pelas doses de gesso aplicadas nas camadas avaliadas (Tabela 2).

Os valores dos DMP médios encontrados no presente estudo foram 2,74 e 2,70 mm para as camadas 0-0,30 e 0,30-0,60 m, respectivamente, valores superiores aos verificados em solos coesos por Vasconcelos et al. (2010) e Vicente et al. (2012).

Os solos que Vasconcelos et al. (2010) avaliaram, apresentavam textura similar aos solos do presente estudo; no entanto, esses autores verificaram valores de DMP entre 2,31 e 1,54 mm na camada até 0,60 m. Essas diferenças podem estar relacionadas a dois fatores metodológicos: o pré-umedecimento e o ciclo do agitador. No presente trabalho utilizou-se álcool para o pré-umedecimento dos agregados, enquanto que em Vasconcelos et al. (2010) utilizou-se água. A água por ter uma tensão superficial maior, não penetra tão facilmente nos poros dos agregados, podendo deixar alguns bolsões de ar aprisionados. Isto pode ter contribuído para uma maior quebra dos agregados no momento da agitação, pelo aumento da pressão interna, superando as forças que mantêm unidos os agregados. Nestas condições, solos coesos quando submetidos à imersão em água, apresentam maior facilidade de esboroamento, muito em função da pressão que o ar exerce na estrutura.

O ciclo do agitador também foi diferente do usado por esses autores, com agitação em 42 ciclos por minuto, enquanto no presente estudo foram 26. A agitação com maior número de ciclos pode ter contribuído para um maior fracionamento dos agregados do solo estudados por Vasconcelos et al. (2010), já que foram expostos a um maior tempo sob agitação, reduzindo assim os valores de DMP.

Na camada superficial, a RP apresentou valores médios maiores no tratamento onde não houve o preparo do solo, com valores em torno de 3,07 MPa; enquanto o tratamento com preparo, foi de 2,34 MPa (Tabela 3). Esses valores, segundo Soil Survey Staff (1993), são classificados como de alta resistência à penetração. Os dados médios de RP de ambos os preparos do solo foram superiores a 2,0 MPa, valor considerado crítico ao desenvolvimento da maioria das culturas (TORMENA et al., 1998; BLAINSKI et al., 2008).

Tabela 3. Resistência do solo à penetração de raízes em função dos sistemas de manejo nas profundidades de 0-0,30 m e 0,30-0,60 m

Doses de Gesso	Resistência do solo à penetração de raízes (MPa)					
	0-0,30 m			0,30-0,60 m		
	CP	SP	Média (G)	CP	SP	Média (G)
0	2,64	3,07	2,86	2,13	2,14	2,14
1	2,52	2,76	2,64	2,36	2,37	2,37
2	2,19	3,11	2,65	1,86	2,41	2,14
4	2,01	3,34	2,67	1,87	2,33	2,10
Média (P)	2,34b	3,07a		2,06b	2,31a	

P = Preparo do solo; G = Gesso; CP = Com preparo; SP = Sem preparo. Médias seguida de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

No entanto, para o cultivo de cana-de-açúcar, tais valores não representam limitações ao crescimento radicular da cana, pois estão abaixo do valor considerado crítico para esta cultura, como verificado por Sá et al. (2016). Para estes autores, o valor crítico de RP para o cultivo da cana foi de 3,8 MPa, que, mesmo sendo sob Latossolo Vermelho acriférico, a textura, muito argilosa, contribuiu para os altos valores encontrados, como relatado por Beutler et al. (2007).

Entretanto, como descrito em Sá et al. (2016), o valor crítico de resistência do solo que limita o crescimento radicular varia com uma faixa ampla na literatura, mostrando não haver consenso quanto à RP limitante para a cultura da cana-de-açúcar. Desse modo, Gonçalves et al. (2014) utilizaram 2,5 MPa, enquanto Cavalieri et al. (2011) e Souza et al. (2015) empregaram 3,0 MPa. Neste contexto, e dentro da mesma classe de solos, os valores de RP do presente estudo estão de acordo com os observados por Zuffo et al. (2013), que verificaram RP variando entre 2,24 e 5,84 MPa, em solos coesos no Espírito Santo.

A umidade obtida no momento da medida de resistência do solo à penetração para a camada de 0-0,30 m foi de 0,098 kg kg⁻¹ ($\pm 0,001$); e na camada de 0,30-0,60 m foi de 0,130 kg kg⁻¹ ($\pm 0,002$).

Como a umidade no momento dos ensaios da RP não variou entre os tratamentos, apenas entre as profundidades, tanto para preparo quanto para as doses de gesso, pode-se atribuir que as diferenças para a RP entre os preparos do solo foram devidas a variação da DS e PT, promovidas pelo preparo do solo.

A maior RP no tratamento sem preparo do solo está relacionado ao tráfego tanto de tratores, para abertura dos sulcos, quanto da carregadeira e caminhões utilizados nas

operações de colheitas da cana, que antecederam o experimento, aliado ao não revolvimento do solo e condições de umidade inadequadas (SOUZA et al., 2015).

Esses dados divergem dos obtidos por Pacheco e Cantalice (2011), que não verificaram aumento a níveis críticos da RP em cana-de-açúcar com o trânsito de máquinas na camada superficial do solo, por terem sido determinados em laboratório.

Avaliando os dados de RP, *in situ*, ao longo da penetração da agulha, até a profundidade de 0,60 m, percebe-se, nitidamente, dois grandes picos nos valores: um entre 0,10-0,20 m; e outro, na faixa de 0,55-0,60 m (Figura 3).

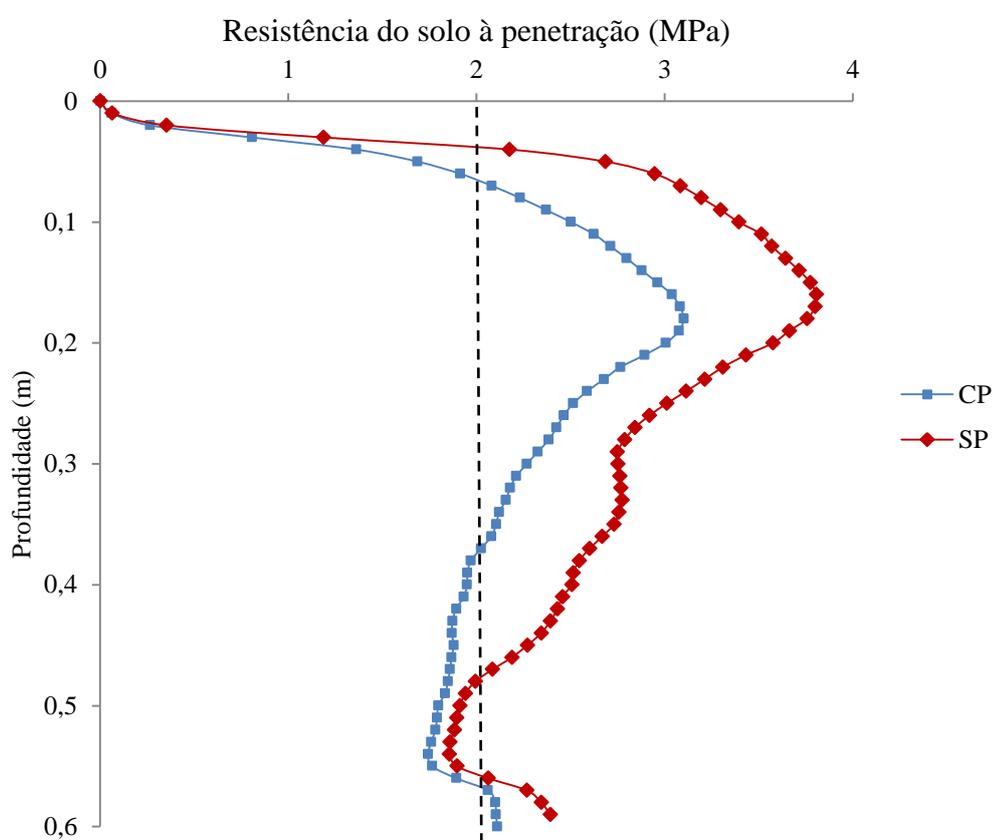


Figura 3. Resistência do solo à penetração de raízes, *in situ*, em função dos manejos com preparo (CP) e sem preparo do solo (SP) e da profundidade avaliada

Os maiores valores de RP observados na faixa de profundidade entre 0,10-0,20 m se devem ao efeito cumulativo da compactação subsuperficial, ocasionada pela grade, denominada de “pé-de-grade” (CORTEZ et al., 2011). O manejo sem o preparo do solo permitiu visualizar a camada compactada nessa profundidade, apresentando tendência a aumentar. Esses resultados permitem inferir que o efeito da compactação nessa profundidade, ocasionado pela grade, tende a permanecer por longos períodos. O preparo do solo foi eficiente em reduzir essa compactação. No entanto, Chamen et al. (2015) afirmam que esse

efeito do preparo de solo, como gradagem e subsolagem, são pouco eficientes no controle da compactação, necessitando intervenções mecânicas periódicas para manter seus efeitos.

O outro pico de RP, embora de menor magnitude que o primeiro, ocorre na faixa de profundidade entre 0,55 e 0,60 m, quando se observa a presença de outra camada compactada, provavelmente formada pelo uso cumulativo e localizado do subsolador. Para este evento, usaremos o termo “pé-de-subsolador”.

No entanto, os efeitos cumulativos do “pé-de-subsolador” na RP são menores do que os observados para o “pé-de-grade”. De fato, observando a Figura 3, é possível notar que a ação do subsolador, atuando a partir da profundidade de 0,30 m, promoveu a redução drástica nos altos da RP, promovidos por ação do “pé-de-grade”, reduzindo a compactação para níveis próximos ao 2 MPa.

A RP foi menor no tratamento com preparo na profundidade de 0,30-0,60m (Tabela 3). Esses dados confirmam que o efeito da subsolagem em solo coeso foi eficiente em quebrar as camadas compactadas ou adensadas em profundidade, conforme também observado por Souza et al. (2014).

Na camada superficial do solo houve regressão linear significativa com as doses de gesso, reduzindo a RP no manejo com preparo do solo (Figura 4).

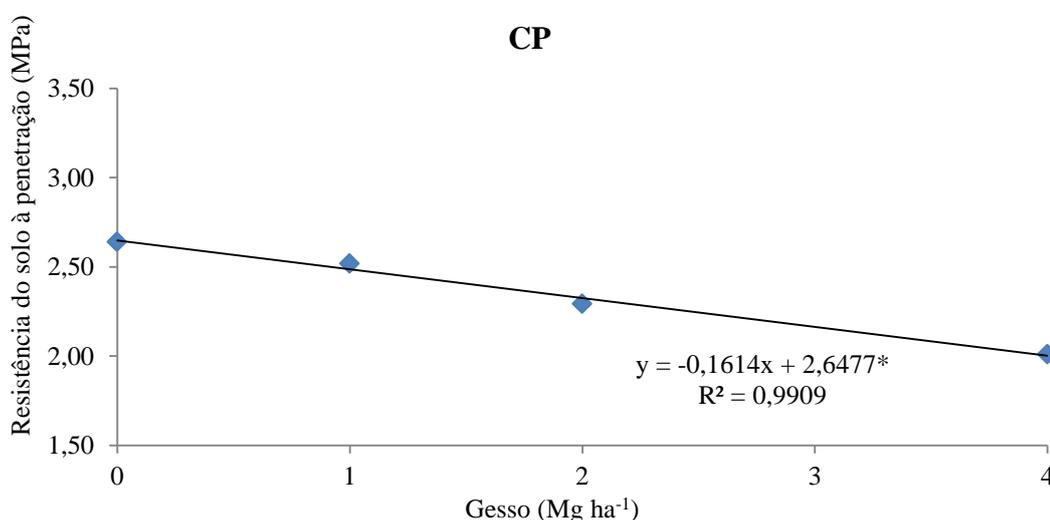


Figura 4. Regressão entre doses de gesso e a resistência do solo à penetração nos manejos com preparo (CP) e sem preparo do solo (SP) na profundidade de 0-0,30 m

Os valores da RP estão diretamente correlacionados com outros atributos físicos do solo, como: textura, densidade do solo e, principalmente, umidade conforme relatado por Stolf et al. (1983) e Busscher et al. (1997). Assim, pode-se inferir que a redução dos valores de RP pelas doses de gesso foi devido ao aumento da U, promovido por essas doses, que também apresentou regressão linear significativa (Figura 5).

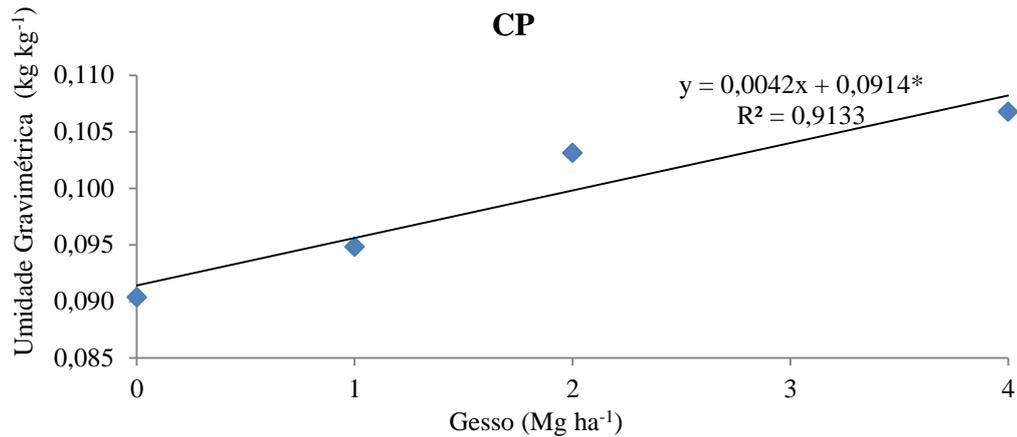


Figura 5. Regressão entre doses de gesso e a umidade gravimétrica do solo medida na avaliação da resistência do solo à penetração nos manejos com preparo (CP) e sem preparo do solo (SP) na profundidade de 0-0,30 m

Os teores de cálcio apresentaram regressão significativa na camada subsuperficial nas parcelas onde houve o preparo do solo, como mostrado na Figura 6. O gesso, mesmo após um ano de sua aplicação, ainda mantém efeitos nos teores de Ca na camada de 0,30-0,60 m.

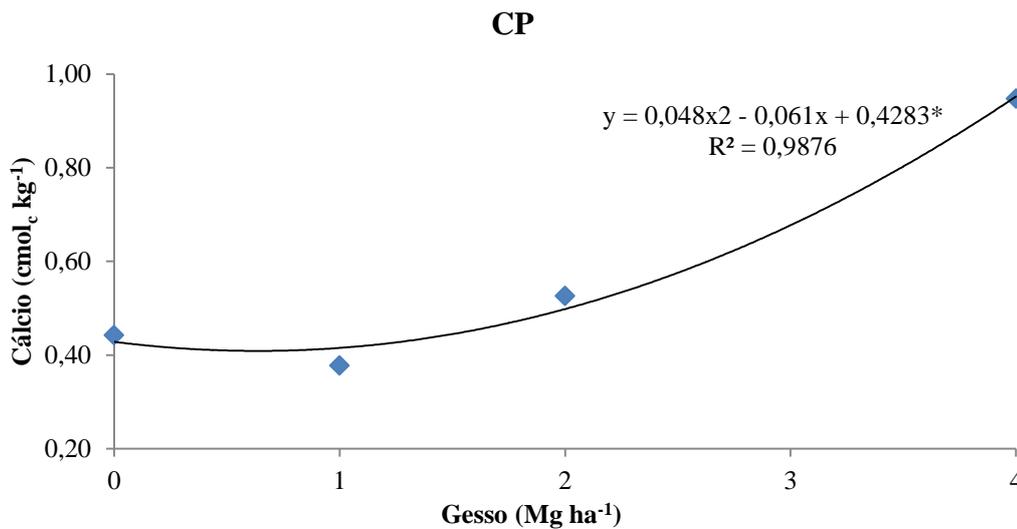


Figura 6. Regressão dos teores de Cálcio no solo em função das doses de gesso nos manejos com preparo (CP) e sem preparo do solo (SP) na camada de 0,30-0,60 m

Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (2015) em Latossolo Amarelo Distrocoeso, onde verificaram que a subsolagem interagiu com o calcário e o gesso para a correção do solo em profundidade.

Esses resultados confirmam a hipótese desta pesquisa, que a subsolagem foi eficiente em promover maiores teores de cálcio em profundidade no Argissolo Amarelo Distrocoeso, alterando a agregação e os atributos físicos do solo.

4.4 Conclusões

1. A resistência tênsil dos agregados do solo foi reduzida pela ação do manejo com gradagem e subsolagem após a aplicação das doses de gesso.
2. A resistência do solo à penetração de raízes foi menor no manejo com gradagem e subsolagem.
3. O preparo do solo com gradagem associado com a subsolagem foi eficiente em aumentar os teores de cálcio na camada com profundidade de 0,30 – 0,60 m.

Referências Bibliográficas

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M, **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements** [internet]. Rome: FAO; 1998. [acesso em: 8 nov 2016], Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>.

ALMEIDA, B.G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Piracicaba, 2008, 103p. Tese (Doutorado: Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ANIKWE, M.A.N.; EZE, J.C.; IBUDIALO, A.N. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.158, n.2, p.32-38, 2016.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.146-151, 2007.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.975-983, 2008.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.33, n.4, p.519-524, 1990.

CAVALIERI, K.M.V.; CARVALHO, L.A. de; SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L.; TORMENA, A.C. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.5, p.1541-1550, 2011.

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

CONAB — **Companhia Nacional de Abastecimento**, Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/17 [internet]. Brasília,DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; 2016 [acesso em: 8 nov 2016]. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_18_14_27_15_boletim_cana_p_ortugues_-_1o_lev_-_16.pdf.

CORTEZ, J.C.; ALVEZ, A.D.S.; MOURA, M.R.D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H.J. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.4, p.1207-1216, 2011.

DANE J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 4. Physical methods. Madison: American Society of Agronomy. (Soil Science Society of America Book Series, 5). 2002. 1692 p.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. **Pressure plate extractor**. In J. H. Dane e G. C. Topp (Eds.) SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 688–690). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.31, n.2, p.139-147, 1985.

DONAGEMMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**, 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. **Particle density**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 229-240). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002a.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. **Porosity**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 241-254). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002b.

GEE, G.W.; OR, D. **Particle size analysis**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 255-293). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.3, p.613-620, 2002.

GONÇALVES, W.G.; SEVERIANO, E. da C.; SILVA, F.G.; COSTA, K.A. de P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. da S.; MELO, G.B. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, n.2, p.432-443, 2014.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. **The solid phase**. In J. H. Dane e G. C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 201-415). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, n.5, p.1656-1661, 2002.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. **Size distribution of aggregates**. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965, p.449-510.

LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; JACOMINE, P.T.K.; ROMERO, R.E.; LIBARDI, P.L. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.467-476, 2004.

NIMMO, J.R.; PERKINS, K.S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. **Soil Science Society of American Book Series**, n.5, p.812-815, 2002.

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

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.403-415, 2011.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2, ed, Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997, 285p. (Boletim Técnico, 100).

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. (2002). **Constant head well permeameter (vadose zone)**. In J. H. Dane e G. C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 844-858). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc.

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

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. **Suction table**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp.692-698). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

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 o uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1610-1622, 2016.

SANTANA, M.B.; SOUZA, L.S.; SOUZA, L.D.; FONTES, L.E.F. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de tabuleiros costeiros do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.1-12, 2006.

SANTOS H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed, Rio de Janeiro:Embrapa Solos, 2013.

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

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

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Survey Manual**. Washington: Soil Conservation Service - United States Department of Agriculture, 1998.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M., COOPER, M.; TORMENA, C.A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.72, n.3, p.270-277, 2015.

SOUZA, J.M.; BONOMO, R.; PIRES, F.R.; BONOMO, D.Z. Atributos físicos do solo em lavoura de cafeeiro conilon submetida à subsolagem. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.22, n.5, p.413-425, 2014.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; URLANI NETO, V.L. **Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar - Stolf**. São Paulo: Planalsucar, 1983.

TOPP, G. C., e FERRÉ, P. A. (2002). **Water content**. In J. H. Dane e G. C. Topp (Eds.), *SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods* (pp.417-446). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.943-952, 2008.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; SILVA, A.J.N.; OLIVEIRA, V.S.; SILVA, Y.J.A.B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.639-648, 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**, Campina Grande, v.16, n.11, p.1215-1222, 2012.

WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.49, n.1, p.73-84, 1998.

YODER, R.E. Adirect method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v.28, n.5, p.337-351, 1936.

ZUFFO, V.J.; PIRES, F.R.; BONOMO, R.; VITÓRIA, E.L.; CELIN FILHO, A.; SANTOS, E.O.J. Effects of tillage systems on physical properties of a cohesive yellow argisol in the northern state of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1372-1382, 2013.

5 CAPÍTULO III - ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE ARGISSOLO COESO SOB SISTEMAS DE MANEJO E DOSES DE GESSO

Resumo

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do preparo do solo com gradagem + subsolagem e doses de gesso nos atributos físico-hídricos em um Argissolo Amarelo distrocoeso. O experimento foi conduzido sob delineamento em blocos ao acaso com esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos nas parcelas principais foram: preparo mecanizado com gradagem + subsolagem; e a ausência de preparo do solo. Nas subparcelas doses de gesso: controle (ausência de gesso); 1; 2 e 4 Mg ha⁻¹, aplicadas em superfície à lanço, antes do preparo do solo. Foram coletadas 576 amostras nas profundidades de 0-0,30 m e 0,30-0,60 m entre os sulcos de plantio. Foram avaliados a curva característica de retenção de água no solo, parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten, intervalo hídrico ótimo e produtividade de colmos da cana-de-açúcar. A subsolagem foi mais efetiva em ampliar a faixa da densidade crítica do solo quando utilizada isoladamente. A dose de gesso com 1 Mg ha⁻¹ melhorou os atributos físico-hídricos do solo, com maior disponibilidade de água às plantas, pelo aumento da densidade crítica do solo, quando preparado com subsolagem. A melhoria nos atributos físico-hídricos do solo devido a aplicação de 1 Mg ha⁻¹ aumentou a produtividade de colmos da cana-planta.

Palavras-chave: Retenção de água. Intervalo hídrico ótimo. Subsolagem. Cana-de-açúcar.

CHAPTER III - PHYSICAL-HYDROLOGICAL ATTRIBUTES OF ULTISOL COHESIVE UNDER MANAGEMENT SYSTEMS AND DOSES OF GYPSUM

Abstract

The objective of the present work was evaluated as the effect of soil preparation with harrowing + Subsoiling and gypsum doses in the physical-hydrological attributes in a dystrocohesive Yellow Ultisol. The experiment was conducted under a randomized complete block design with subdivided plots with four replicates, totalizing 32 experimental units. The treatments in the main plots were: mechanized preparation with gradation + subsoiling; and an absence of soil preparation. In the subplots the doses of plaster were: control (absence of gypsum); 1; 2 and 4 Mg ha⁻¹ applied to the soil surface before soil preparation. A total of 576 samples were collected at 0-0.30 m and 0.30-0.60 m between the planting grooves. This model has a water retention curve there is no soil, the adjustment of casing model, least limiting water range and the sugarcane productivity. Subsoiling was more effective in increasing the range of critical soil bulk density when applied alone. The dose of gypsum with 1 Mg ha⁻¹ improved the physical-water attributes of the soil, with greater availability of water to the plants, by increasing the critical bulk density of the soil, when prepared with subsoiling. The improvement in the physical-water laboratories of the soil by an application of 1 Mg ha⁻¹ increased sugarcane productivity.

Keywords: Water retention. Least limiting water range. Subsoiling. Sugarcane.

5.1 Introdução

Devido a conscientização global sobre as mudanças climáticas, há necessidade de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis produzidas por culturas como a cana-de-açúcar. Nesse aspecto, a indústria canavieira apresenta papel de destaque, pois pode ser fonte de alimento, como na produção de açúcar; como de energia limpa, fornecida por meio do etanol.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com a produção na safra 2016/2017 próxima a 700 milhões de toneladas, em área pouco superior a 9 milhões de hectares (CONAB, 2017). Na Região Nordeste a indústria sucroalcooleira apresenta importância histórica e cultural. No entanto, nos últimos anos, a Região Nordeste vem perdendo espaço para a Sudeste, especialmente São Paulo. Um dos principais problemas para a cultura da cana-de-açúcar no Nordeste é a irregular distribuição das chuvas, que em muitas regiões, não atendem a real necessidade hídrica das plantas, necessitando, para isto, do importante uso da irrigação (DANTAS NETO et al., 2006).

Outro problema comum são os elevados teores de alumínio dos solos tropicais, como os que ocorrem na Zona da Mata de Pernambuco, que reduzem o desenvolvimento radicular e, portanto, dificultam o seu acesso às reservas de água e nutrientes em profundidade. Assim, a utilização de gesso agrícola como forma de melhorar o ambiente radicular tem sido estudada (MORELLI et al., 1992; SOUSA et al., 1995).

Portanto, além da irrigação, a correção do solo também é uma técnica que pode contribuir para uma maior produtividade da cultura e melhor qualidade do produto (CAIRES et al., 2001). Por meio da melhor distribuição das raízes, a aplicação de gesso pode contribuir para que a planta resista melhor ao déficit hídrico (SOUSA et al., 1995).

Normalmente, a aplicação de gesso ocorre junto à aplicação de calcário, utilizando-se para isso a gradagem. A prática da gradagem é também utilizada para a incorporação de restos culturais e para fornecer melhores condições físicas iniciais, além de melhorar a distribuição do sistema radicular das espécies vegetais.

O preparo do solo por meio da gradagem, embora em um momento inicial promova melhoria na porosidade, à longo prazo causa a redução da macroporosidade e condutividade hidráulica do solo, bem como o aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração (SILVA; MIELNICZUK, 1998; BORTOLUZZI et al., 2008; BILIBIO et al., 2010).

A estabilidade estrutural afeta o desenvolvimento e produtividade das culturas, uma vez que está relacionada a atributos físicos do solo como disponibilidade de ar e água às

raízes, resistência mecânica à penetração e desenvolvimento do sistema radicular (CORRÊA, 2002; RIBEIRO et al., 2007).

A manutenção de uma adequada umidade no solo durante todo o período de crescimento da planta é um fator importante para obter os rendimentos potenciais da cultura, visto que o crescimento vegetativo é proporcional à água transpirada (DALRI et al., 2008). Klein e Libardi (2000) afirmam que os fatores do solo que afetam a disponibilidade de água às culturas são: a estrutura do solo; a distribuição do diâmetro dos poros; a textura; o tipo e quantidade de argila e o teor de matéria orgânica.

Assim, a interação desses fatores irá descrever a capacidade do solo em armazenar água, apresentando grande variabilidade temporal e espacial. A distribuição dos poros na matriz do solo desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, determinando a evolução espacial e temporal dos processos que envolvem o movimento da água no solo e o comportamento físico-hídrico do solo, influenciando a sua potencialidade agrícola (RIBEIRO et al., 2007).

Neste sentido, a curva característica de retenção de água pelo solo (CCRAS) é uma eficiente ferramenta para avaliar o armazenamento de água em diferentes tensões. A respeito disso, Silva et al. (2010) afirmaram que a CCRAS descreve graficamente a habilidade do solo para armazenar água em diferentes tensões, e expressa a relação entre a energia com que a água está retida nos poros do solo (potencial matricial, Ψ) e o seu respectivo conteúdo de água (podendo ser expresso volumetricamente, θ ; ou gravimetricamente, U). Assim, a CCRAS é elaborada pela determinação do conteúdo de água no solo em diferentes tensões (Jorge et al., 2010).

Um “novo” conceito para disponibilidade de água às plantas foi proposto por Silva et al. (1994): o intervalo hídrico ótimo (IHO), sendo introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998). Segundo estes autores, o IHO integra, além das variáveis tradicionalmente utilizadas [capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP)], mais duas outras que são também apropriadas para avaliação da disponibilidade de água.

Assim, o limite inferior do IHO é o conteúdo de água no PMP ou a umidade na qual a resistência do solo à penetração é de 2,0 MPa; e o limite superior é o conteúdo de água no solo na CC ou a umidade na qual a porosidade de aeração mínima é 10%. O IHO é definido por Tormena et al. (1998) como a faixa de conteúdo de água no solo em que as limitações para o crescimento das plantas em função do potencial mátrico, aeração e resistência à penetração do solo são nulas.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os atributos físico-hídricos do solo sob diferentes sistemas de manejo e doses de gesso, a partir da construção da curva característica de retenção de água nos solos, com a quantificação da RP e IHO.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina – PE, sob as coordenadas 7°51'13"S e 35°14'10"W.

O experimento foi conduzido no período entre junho de 2014 e outubro de 2015, no primeiro ciclo de cultivo de cana-de-açúcar, cultivar RB867515. O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo Ams, tropical chuvoso de monção, com verão seco e a altitude do município é de 180 m.

O solo foi classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), correspondente ao Ultisol segundo Soil Survey Staff (1998).

O solo foi caracterizado física e quimicamente e estas propriedades estão apresentadas na Tabela 1.

Fisicamente o solo foi caracterizado seguindo-se metodologia preconizada por Dane e Topp (2002), resumidamente comentada a seguir.

Na análise granulométrica, para definir a distribuição de partículas sólidas por tamanho (areia, silte e argila) e classe textural do solo, foi utilizado o método do densímetro, segundo Gee e Or (2002), com adaptações conforme comentadas em Almeida (2008), onde a leitura da fração argila é realizada após 24h, a areia é obtida por peneiramento, e o silte calculado por diferença [$\text{silte}_{\%} = (\text{areia}_{\%} + \text{argila total}_{\%}) - 100$]. Com os dados das argilas total e dispersa em água, calculou-se o grau de flocculação (GF) e o grau de dispersão (GD).

Tabela 1. Características físicas e químicas das camadas superficial e subsuperficial do Argissolo Amarelo distrocoeso utilizado no experimento

Parâmetro	0-0,30 m	0,30-0,60 m
pH (H ₂ O)	4,60	4,40
H+Al (cmolc dm ⁻³)	4,40	7,55
Al ⁽¹⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,50	1,15
H ⁽²⁾ (cmolc dm ⁻³)	3,90	6,40
Ca ⁽¹⁾ (cmolc dm ⁻³)	1,30	0,95
Mg ⁽¹⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,30	0,20
K ⁽³⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,10	0,03
Na ⁽³⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,03	0,02
CTC _{efetiva} (cmolc dm ⁻³)	2,23	2,35
CTC _{potencial} (cmolc dm ⁻³)	6,13	8,75
V (%)	28,21	13,76
m (%)	22,44	48,85
Carbono orgânico total (%)	0,96	0,77
Matéria orgânica (%)	1,66	1,33
P ⁽³⁾ (mg dm ⁻³)	9,00	2,10
Areia Total (g kg ⁻¹)	656,50	630,85
Areia Fina (g kg ⁻¹)	168,20	180,00
Areia Grossa (g kg ⁻¹)	488,30	450,85
Silte (g kg ⁻¹)	91,00	45,95
Argila (g kg ⁻¹)	252,50	323,2
Classe textural	Fr-Arg-Ar	Fr-Arg-Ar
Grau de Floculação (%)	14,85	12,55
Grau de Dispersão (%)	85,15	87,45
Densidade de partículas (Mg m ⁻³)	2,61	2,40
Densidade do Solo (Mg m ⁻³)	1,55	1,34
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	0,41	0,48
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,14	0,19
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,27	0,29
Capacidade de Campo (m ³ m ⁻³)	0,24	0,26
Ponto de Murcha Permanente (m ³ m ⁻³)	0,17	0,18
Condutividade hidráulica saturada (mm h ⁻¹)	69,92	90,04

⁽¹⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽²⁾ Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0; ⁽³⁾ Extrator Mehlich-1; CTC = Capacidade de Troca de Cátions; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio; Fr-Arg-Ar: Franco-Argilo-Arenosa.

A densidade das partículas sólidas do solo (DP) foi obtida pelo método do picnômetro (FLINT; FLINT, 2002a); e a densidade do solo (DS), pelo método do anel volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

A porosidade total (PT) foi determinada de acordo com Flint e Flint (2002b). A macroporosidade (MaP) foi calculada usando os dados da PT e MiP (MaP = PT – MiP). A

microporosidade (MiP) e umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}) foram obtidas usando a Mesa de Tensão (ROMANO et al., 2002); sendo a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) determinada via Câmara de Richards (DANE; HOPMANS, 2002).

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi obtida pelo método do permeâmetro de carga constante, por meio da aplicação da equação de Darcy, segundo metodologia sugerida em Reynolds e Elrick (2002).

A caracterização química foi realizada de acordo com metodologias sugeridas em Donagema et al. (2011). Desse modo, o pH foi determinado na relação 1:2,5 (solo:H₂O). Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos com KCl 1,0 mol L⁻¹ e dosados por titulometria. Quanto ao P, K^+ , Na^+ , Fe, Cu, Zn e Mn estes foram extraídos com Mehlich-1, sendo o P dosado por espectrofotometria, o K^+ e Na^+ por fotometria de chama; e o Fe, Cu, Zn e Mn por espectrofotometria de absorção atômica. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ e dosada por titulometria. O carbono orgânico total (COT) foi determinado por combustão úmida pelo dicromato de potássio e dosado por titulometria. Com os resultados dessas análises químicas, calculou-se: a saturação por bases (V); a saturação por Al (m); a capacidade de troca de cátions efetiva ($CTC_{efetiva}$); e a capacidade de troca de cátions potencial ($CTC_{potencial}$).

5.2.2 Manejo de cultivo da cana-de-açúcar

A área agrícola utilizada antes da montagem do experimento foi cultivada por 50 anos com cultivo convencional de cana-de-açúcar e foi preparada para implantação do experimento em junho de 2014. O manejo para renovação do canal consistiu na dessecação da socaria do cultivo anterior, utilizando o herbicida Glyphosate[®] na dosagem de 4,0 L ha⁻¹.

A correção do solo consistiu na aplicação de 3,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de 79,3% (33,6% CaO e 17,8% MgO). A necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases, com o objetivo de elevar a V para 60% da $CTC_{potencial}$ do solo (Raij et al., 1997). O calcário foi aplicado à lança em superfície e incorporado até 0,30 m de profundidade.

Após a abertura dos sulcos (60 dias depois da aplicação de calcário), o plantio foi realizado manualmente no mês de Agosto de 2014, utilizando-se rebolos de três gemas, distribuídos em sulcos com oito metros de comprimento, para que se atingisse uma densidade de plantio de 16 a 18 gemas por metro linear.

Na adubação de plantio foi aplicado no fundo do sulco 500 kg ha^{-1} da formulação 12-24-18 e as fontes de N, P e K utilizadas foram sulfato de amônio + ureia, fosfato monoamônio e cloreto de potássio, respectivamente.

O cultivo da cana-de-açúcar foi conduzido sob irrigação plena. Utilizaram-se aspersores com dois bocais ($4,0 \times 2,8 \text{ mm}$) e vazão nominal de $1,29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, dispostos em campo num espaçamento de $12 \times 12 \text{ m}$. Foram realizadas irrigações a cada dois dias, sendo a lâmina de irrigação calculada pelo somatório da evapotranspiração da cultura (Etc), descontando-se as eventuais precipitações pluviais no período. A evapotranspiração da cultura foi calculada com base no produto do coeficiente da cultura (Kc) pela evapotranspiração de referência (Etr), estimada pela evaporação do Tanque Classe A, de acordo com Allen et al. (1998). A lâmina total de irrigação aplicada foi de 786 mm e a precipitação pluvial foi de 1.029 mm (Figura 1).

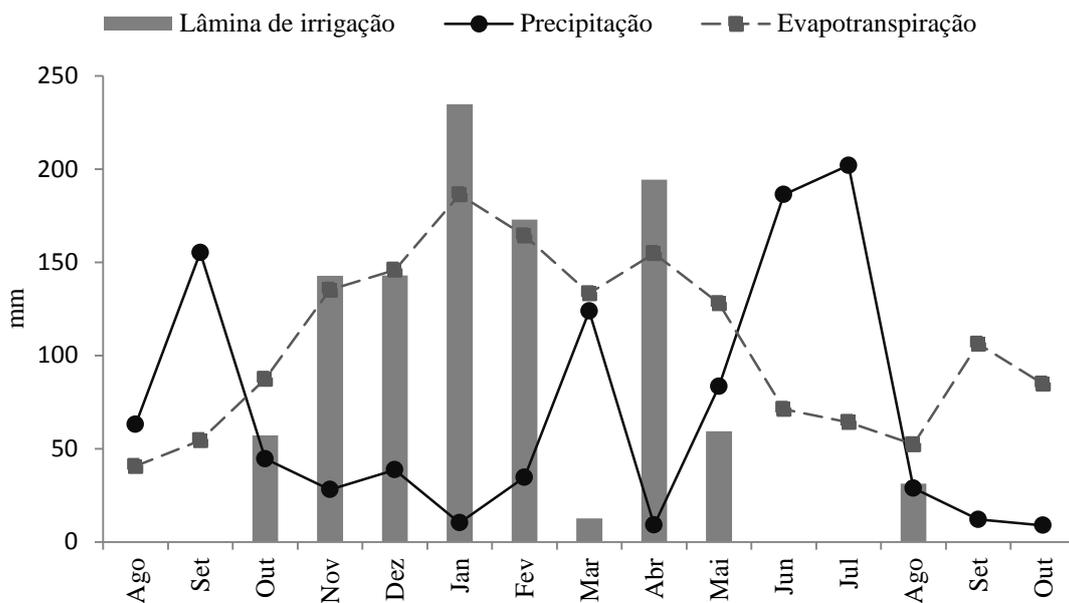


Figura 1. Distribuição da precipitação, evapotranspiração e a lâmina bruta total de irrigação durante o ciclo da cana-planta na área do experimento na EECAC

Para estimativa da produtividade de colmos foi utilizado o método proposto por Gheller et al. (1999), que se baseia na contagem de todos os colmos maiores que 1 m nas três linhas centrais antes do tombamento da cana-de-açúcar. Nestes três sulcos foram pesadas 20 plantas, escolhidas aleatoriamente. Com isso, obteve-se a média de peso por planta. Assim, o peso médio por colmo foi estimado por meio da equação (1):

$$p_{mc} = \frac{pf}{t_{colmos}} \quad (1)$$

em que: p_{mc} é o peso médio por colmo; p_f é o peso total dos colmos colhidos; e t_{colmos} é o total de colmos amostrados.

O peso médio estimado da parcela (p_{mp}) foi calculado pela equação (2). A partir do peso médio estimado por parcela calculou-se a PROD por hectare.

$$p_{mp} = p_{mc} \times \text{total de colmos da parcela} \quad (2)$$

5.2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Os tratamentos nas parcelas principais constaram de preparo mecanizado com gradagem + subsolagem do solo (CP) e da ausência de preparo (SP).

O sistema de preparo do solo foi realizado por meio de subsolagem, com cinco passadas em cada parcela a uma profundidade de 0,50 m e, posteriormente, três passadas da grade intermediária (discos de 24''), até a profundidade de 0,20 m. No sistema sem preparo do solo foi realizada apenas a sulcagem direta, com 0,30 m de profundidade.

Nas subparcelas, os tratamentos foram: o controle (ausência de gesso, G0); e mais três doses de gesso (20% de Ca e 16% de S), com doses de 1; 2 e 4 Mg ha⁻¹ (G1; G2 e G4, respectivamente), aplicadas em superfície à lanço, antes do preparo do solo.

As parcelas experimentais tinham área total de 56 m², constituídas por 7 linhas de cultivo, com espaçamento de 1,0 m entre sulcos e 8 m de comprimento. A área útil da parcela foi considerada como as três fileiras centrais e 6 m de comprimento, desprezando-se dois sulcos das extremidades da parcela e 1 m de cada lado das cabeceiras dos sulcos como bordadura, totalizando a área útil com 18 m².

5.2.4 Análises físicas

Foram coletadas nove amostras não deformadas por parcela no final do ciclo da cana-planta (Novembro de 2015), utilizando-se anéis volumétricos em aço inoxidável com volume $\cong 10^{-4}$ m³, nas profundidades de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, nas entrelinhas de plantio, totalizando 576 amostras (conjunto anel-amostra).

Para a construção da curva característica de retenção de água nos solos (CCRAS) foram utilizados os conjuntos anel-amostra. Estes foram colocados em bandejas plásticas, forradas com espuma (2 cm de espessura) e saturados por ascensão capilar em água desaerada. O nível de água foi sendo elevado lentamente, até alcançar 2/3 do volume do anel, ficando nestas condições por 24 horas. Em seguida, cada conjunto anel-amostra foi

transferido para mesa de tensão e submetido aos potenciais de -1, -6 e -10 kPa. Para potenciais menores, foram utilizadas as câmaras de Richards com placas porosas específica para cada pressão, para obtenção dos potenciais de -33, -80, -300, -500 e -1500 kPa. Após o equilíbrio das amostras em cada potencial, os conjuntos anel-amostra foram pesados, obtendo-se a umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$).

Com os dados da CCRAS os demais valores das θ em função de Ψ foram obtidos por meio do ajuste dos dados via modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), utilizando o software “Retention curve” - RetC (vAN GENUCHTEN et al., 1991), que fornece os valores dos seguintes parâmetros: θ_s , θ_r , α , n e m , pelo uso da equação (3).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha |\Psi|)^n]^m} \quad (3)$$

em que: θ – é a umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$); θ_s – é a umidade volumétrica de saturação ($m^3 m^{-3}$); θ_r - é a umidade volumétrica residual no potencial de -1500 ($m^3 m^{-3}$); α – é o parâmetro de ajuste inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros (cm^{-1}); $|\Psi|$ é o módulo do potencial de água do solo (cca); n – parâmetro de ajuste relacionado com a forma da CCRAS; m – parâmetro de ajuste da equação, calculado pela expressão: $m = 1 - 1/n$, onde $0 < m < 1$, de acordo com van Genuchten (1980).

Após determinação da CCRAS, e o equilíbrio em cada uma das tensões aplicadas, um conjunto anel-solo foi pesado e em seguida realizado os ensaios de RP, por meio de um penetrômetro eletrônico de bancada. A agulha utilizada tem base na forma de cone, com 4 mm de espessura e ângulo de 30°, sendo inserida na amostra com velocidade de 0,03 $mm s^{-1}$. O aparelho é acoplado a um computador para a aquisição dos dados. Na sequência, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, para determinação do conteúdo de água em cada tensão e densidade do solo.

O IHO foi determinado conforme descrito em Silva et al. (1994), para cada amostra, tendo-se o valor da densidade do solo conhecido para cada ensaio. Para obtenção do IHO os valores críticos para o crescimento das culturas, associados com o potencial mátrico, RP e porosidade de aeração foram: a capacidade de campo (θ_{CC}), determinada como conteúdo de água no potencial de -10 kPa; o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), determinada como conteúdo de água no potencial de -1500 kPa; o conteúdo de água no solo em que a resistência à penetração atinge o valor de 2,0 MPa (θ_{RP}); e o conteúdo de água no solo em que a porosidade de aeração é de 10% (θ_{PA}).

Para obtenção dos parâmetros de ajuste referentes à θ_{CC} e ao θ_{PMP} os dados obtidos foram ajustados pela equação não linear de Ross et al. (1991), incorporando-se a densidade do solo ao modelo, conforme proposto por Leão et al. (2005), utilizando-se a equação (4):

$$\theta = \exp(a + b DS) \Psi^c \quad (4)$$

em que: θ – é a umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$); DS – densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Ψ – é o potencial da água no solo, aqui assumido como a tensão aplicada e equilibrada (kPa); e **a**, **b** e **c** são os parâmetros de ajuste do modelo.

De posse dos parâmetros **a**, **b** e **c** da equação de Ross et al. (1991), os dados de θ_{CC} e θ_{PMP} foram ajustados à densidade do solo, para confecção das respectivas retas, por meio das equações (5) e (6):

$$\theta_{CC} = \exp(a + b DS) \Psi_{CC}^c \quad (5)$$

$$\theta_{PMP} = (\exp(a + b DS)) \Psi_{PMP}^c \quad (6)$$

em que: θ_{CC} – é a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$); Ψ_{CC} – é o potencial de água na capacidade de campo, aqui assumido como - 10 kPa; DS – é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$); θ_{PMP} – é a umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$); Ψ_{PMP} – é o potencial de água no ponto de murcha permanente, aqui assumido como - 1500 kPa; **a**, **b** e **c** são os parâmetros de ajuste obtidos pela equação (4).

A porosidade de aeração (θ_{PA}) foi obtida conforme equação (7), e os dados linearizados a partir da DS :

$$\theta_{PA} = \left[1 - \left(\frac{DS}{DP} \right) \right] - 0,1 \quad (7)$$

em que: θ_{PA} – é a umidade volumétrica do solo em que a porosidade de aeração atinge o valor de 10 %; DS – é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$); e DP – é a densidade de partículas sólidas do solo, expressa em $Mg m^{-3}$.

A partir dos dados de umidade e DS , obtidos da CCRAS de cada amostra, utilizou-se o modelo matemático não linear de Busscher (1990) para obtenção dos parâmetros de ajuste **d**, **e** e **f**, conforme equação (8):

$$RP = d DS^e \theta^f \quad (8)$$

em que: RP - é a resistência do solo à penetração de raízes (MPa); DS - é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); θ - é a umidade volumétrica no momento da medida de RP ($m^3\ m^{-3}$); sendo **d**, **e** e **f** os parâmetros de ajuste do modelo.

Com o ajuste da curva de resistência do solo à penetração e os parâmetros de ajuste do modelo (**d**, **e** e **f**), obtidos na equação de Busscher (1990), determinou-se o conteúdo de água no solo no qual a resistência do solo à penetração atinge o valor crítico de 2 MPa (θ_{RP}), em função da densidade do solo, por meio da equação (9):

$$\theta_{RP} = \frac{RP_{crítica}}{(d\ DS^f)^{1/e}} \quad (9)$$

em que: θ_{RP} - é a umidade volumétrica do solo na qual a resistência à penetração de raízes se torna crítica; $RP_{crítica}$ é a resistência do solo crítica para as culturas, aqui assumida como 2 MPa; DS - é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); **d**, **e** e **f** são os parâmetros de ajuste do modelo obtidos na equação (8).

O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e o inferior dos conteúdos de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados. O limite superior será o menor valor de θ considerando a capacidade de campo ou a porosidade de aeração à 10%; e o limite inferior será o maior valor de θ na resistência de 2,0 MPa ou no ponto de murchamento permanente.

5.2.5 Análises estatísticas

Para determinação dos coeficientes das equações (3), (4) e (8), utilizou-se o método do mínimo quadrado dos desvios e algoritmo de Levenberg-Marquardt.

Os dados de produtividade de colmos foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliação da normalidade. Os dados apresentaram normalidade e tiveram seus resultados analisados aplicando o teste F (ANOVA). As comparações das médias dos tratamentos foram realizadas por meio do teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

5.3 Resultados e Discussão

A Figura 2 ilustra a curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) nas profundidades de 0-0,30 e 0,30-0,60 m para os dois sistemas de manejo do solo. Nessas CCRAS, é possível observar uma tendência no formato da curva referente ao manejo CP em apresentar maior retenção de água sob baixas tensões (mais altas umidades), especialmente até o limite de - 1 kPa, representado pela macroporosidade.

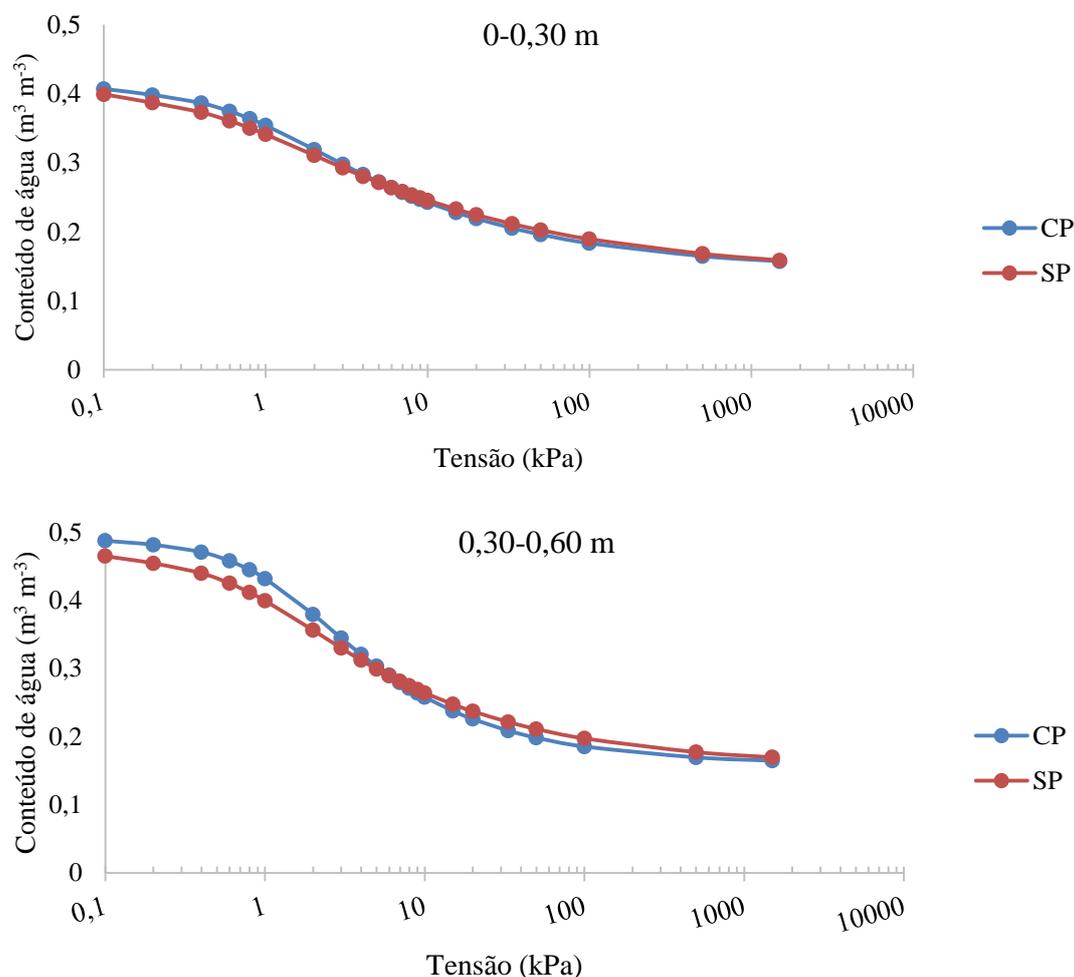


Figura 2. Curva característica de retenção de água no solo no manejo com preparo mecanizado (CP) e sem preparo (SP), nas profundidades de 0-0,30 e 0,30-0,60 m

Esses resultados permitem inferir que o preparo do solo aumentou os poros de maior tamanho, como os macroporos, e esse efeito se estendeu até o fim do ciclo da cana-planta. Tais resultados confirmam os observados por Silva et al. (2005) em Argissolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

O cultivo de cana-de-açúcar sob sistema de manejo SP aumentou a compactação do solo, com conseqüente redução do volume de macroporos. Segundo Freddi et al. (2009), a macroporosidade, assim como a resistência do solo à penetração, são as variáveis mais sensíveis às modificações causadas pela compactação, ocasionada pelo tráfego de tratores, como ocorre no plantio da cana-de-açúcar.

Os poros de maior diâmetro (macroporos) são menos resistentes e se deformam mais facilmente, formando poros de menor diâmetro (microporos), que são mais resistentes e suportam maiores pressões (BEUTLER et al., 2006).

A diferença mais nítida entre as curvas para o manejo do solo foi observada na profundidade de 0,30-0,60 m. Sobre isto, a literatura mostra que este comportamento não é um fato isolado, como registrado por Souza et al. (2014). Estes autores, trabalhando com Argissolo Amarelo coeso do Espírito Santo, obtiveram resultados semelhantes aos observados no presente estudo.

Nesta profundidade, não houve interferência direta da gradagem (com profundidade de ação $\cong 0,20$ m), pois foi atingida apenas pela subsolagem, permitindo inferir que esta foi efetiva em promover aumento dos poros de maior diâmetro, do que quando associada à gradagem, realizada na profundidade mais superficial.

O efeito deste manejo é bem discutido por outros pesquisadores, como em Souza et al. (2014), onde observaram que a subsolagem proporcionou maior retenção de água em baixas tensões e aumentou a água disponível às plantas.

Por meio do intervalo de confiança (0,95) dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980), listados na Tabela 2, observa-se que a θ_s foi estatisticamente maior no manejo com preparo mecanizado do solo na camada subsuperficial.

Nesta camada, a subsolagem também refletiu em maior porosidade total do solo, que foi expressa pela maior umidade de saturação, e persistiu até o final do ciclo da cana-planta.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste da equação $\theta = \theta_r + [(\theta_s - \theta_r)/(1 + (\alpha |\Psi|)^n)]^{1-1/n}$ para os sistemas de manejo adotados

Parâmetro	Com Preparo				Sem preparo			
	Coef. ⁽¹⁾	Valor de T	IC _{Inferior}	IC _{Superior}	Coef. ⁽¹⁾	Valor de T	IC _{Inferior}	IC _{Superior}
Camada 0-0,30 m								
θ_R	0,144	19,760	0,129	0,158	0,136	15,180	0,118	0,153
θ_S	0,407	78,050	0,397	0,417	0,399	89,190	0,390	0,408
α	1,136	5,300	0,712	1,560	1,586	5,140	0,976	2,197
n	1,399	29,750	1,306	1,493	1,314	34,820	1,239	1,388
Camada 0,30-0,60 m								
θ_R	0,159	31,000	0,149	0,170	0,157	22,460	0,143	0,171
θ_S	0,487	81,650	0,476	0,499	0,465	81,890	0,454	0,475
α	0,766	7,220	0,556	0,975	1,147	6,070	0,773	1,521
n	1,583	29,830	1,478	1,688	1,429	32,280	1,341	1,516

⁽¹⁾Coeficiente; IC: Intervalo de Confiança (0,95).

Esses resultados confirmam os observados por Silva et al. (2015), onde verificaram que a subsolagem manteve seus efeitos na porosidade total em um Latossolo Amarelo distrocoeso, durante o período de dois anos. Essa diferença na umidade de saturação se deve ao efeito da subsolagem na estrutura dos poros, promovendo diferenças na retenção de água.

Para os demais parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (1980), não foram observadas diferenças estatísticas, comparadas pelo intervalo de confiança (0,95). Bortolanza e Klein (2016) também não observaram diferenças estatísticas entre esses parâmetros, avaliando alterações destes devido o preparo do solo e das doses de gesso e calcário aplicadas. No entanto, todos os parâmetros apresentaram ajuste significativo, pois não houve entre nenhum dos intervalos de confiança o valor zero (GLANTZ; SLIKER, 1990).

Na camada 0-0,30 m, sob manejo com preparo mecanizado do solo, as doses de gesso não afetaram os traçados das CCRAS. Esse fato comprova que o gesso, na camada superficial, não influenciou os atributos físicos do solo. No entanto, nos solos sem preparo mecanizado, houve uma pequena tendência de as doses de gesso apresentar maiores quantidades de poros de maior tamanho, quando comparado ao controle, especialmente macroporos, conforme ilustra a Figura 3.

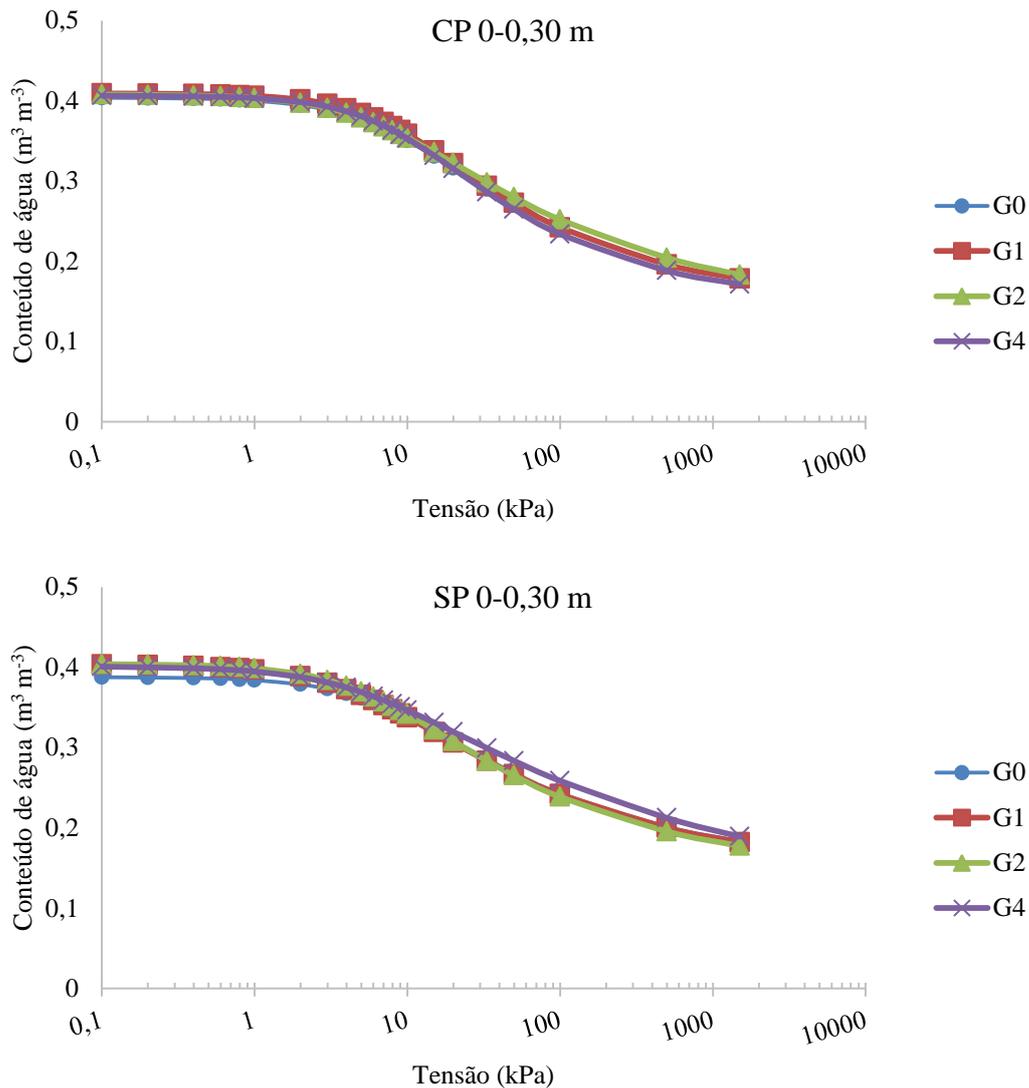


Figura 3. Curva característica de retenção de água no solo no manejo com preparo (CP) e sem preparo (SP) mecanizado em função das doses de gesso 0, 1, 2 e 4 Mg ha⁻¹ (G0, G1, G2 e G4, respectivamente) na profundidade de 0-0,30m

Essa tendência das doses de gesso em aumentar os poros de maior tamanho pode estar relacionada possivelmente a uma maior agregação do solo devido ao efeito flocculante do Ca²⁺. Outra possibilidade é o efeito indireto que o gesso promove na agregação do solo, pelo maior desenvolvimento radicular e produção de exsudatos radiculares, conforme observado por Anikwe et al. (2016) em um Ultisol da Nigéria.

Na camada de 0,30-0,60 m, no manejo com preparo mecanizado, a dose de gesso com 1 e 2 Mg ha⁻¹ apresentaram maiores quantidades de poros de maior tamanho até a tensão de 100 kPa (Figura 5). Esses resultados convergem os verificados por Nogueira et al. (2016), que observaram em parcelas mecanizadas que a aplicação de gesso aumentou o volume de

macroporos, microporos e porosidade total, em relação a parcela sem mecanização, com a aplicação conjunta de 2 Mg ha⁻¹ de gesso.

Esses resultados confirmam que a aplicação de gesso nas doses de 1 e 2 Mg ha⁻¹, provavelmente, possam ter contribuído para aumentar o grau de flocculação das argilas do solo, criando mais espaços entre os agregados, melhorando assim a porosidade total do solo (INAGAKI et al., 2016).

No manejo sem preparo do solo, as diferenças entre os formatos das CCRAS, na faixa com poros com maiores diâmetros, foram mais nítidas devido a ação das doses, diferindo-se entre si e do controle, mas apenas para tensões menores que a θ_{CC} , isto é, entre 0 e 10 kPa. A partir desta tensão, os efeitos das doses de gesso não foram mais observados, como ilustrado pela quase sobreposição das CCRAS.

Na dose de 1 Mg ha⁻¹ de gesso o solo respondeu com maiores quantidades de poros de maior diâmetro; sendo que a dose com 4 Mg ha⁻¹ teve ação preferencial nos poros de menores tamanhos.

As diferenças mais nítidas ocorridas na camada de 0,30-0,60 m podem estar relacionadas a maior ação do gesso quando combinado com a subsolagem, do que quando comparado com a camada superficial, sob ação apenas da gradagem.

A respeito disso, Anikwe et al. (2016) comentam que, o aumento dos poros de maior tamanho pode ser efeito da uma maior agregação do solo, promovida pelo maior desenvolvimento radicular, que também leva à criação de mais espaços inter-agregados, promovendo uma maior quantidade de poros de diâmetro maior, como os macroporos.

Com relação à disponibilidade de água às plantas, avaliada pelo intervalo hídrico ótimo (IHO), a Figura 5 ilustra os valores para a camada de 0-0,30 m, sob os dois sistemas de preparo do solo.

Verifica-se que no manejo sem preparo do solo a densidade crítica (DSc) para IHO ocorreu com valor maior, de 1,65 Mg m⁻³; quando comparado com o manejo mecanizado, que promoveu valor de DSc menor, 1,55 Mg m⁻³.

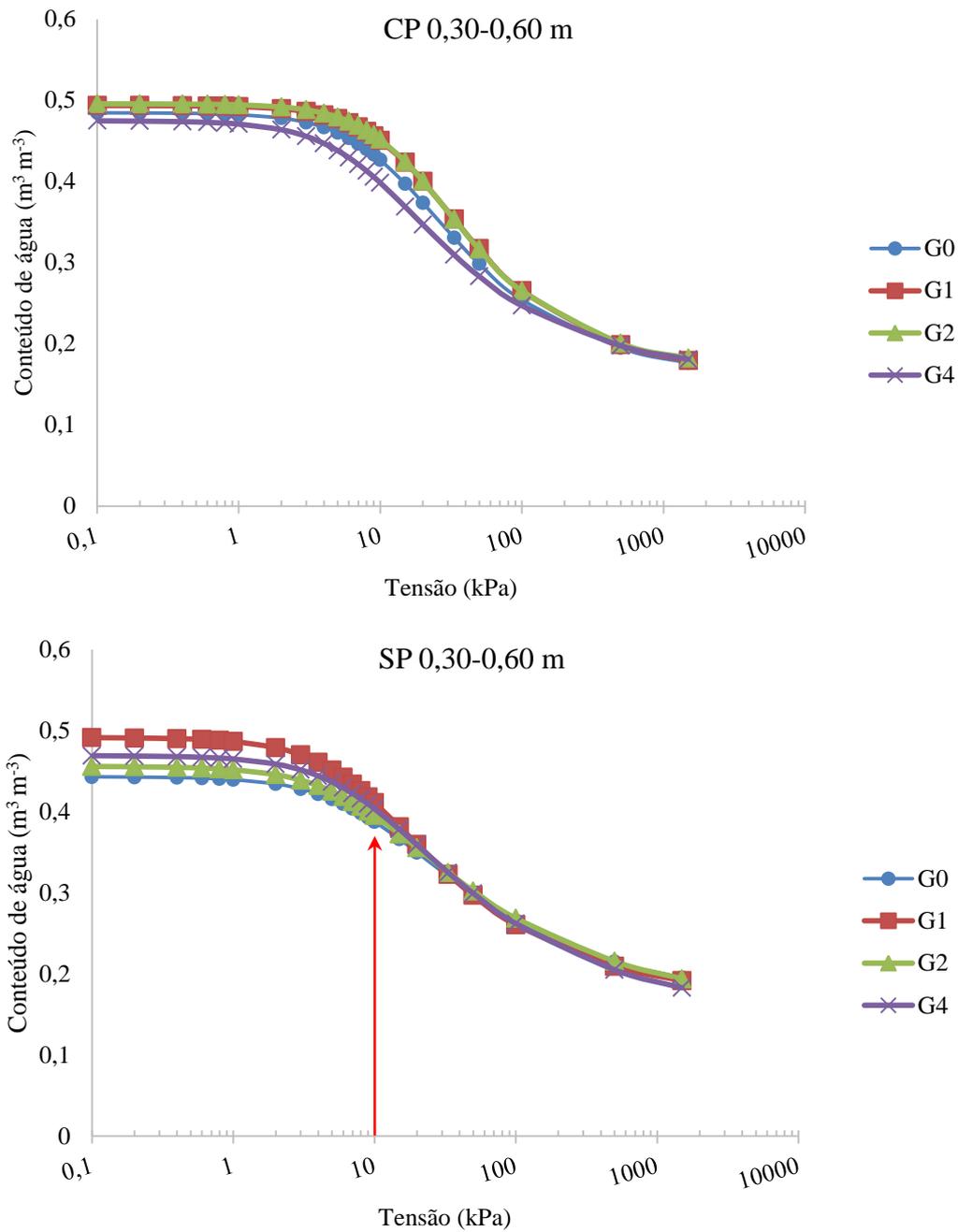


Figura 4. Curva característica de retenção de água no solo no manejo com preparo (CP) e sem preparo (SP) mecanizado em função das doses de gesso 0, 1, 2 e 4 Mg ha⁻¹ (G0, G1, G2 e G4, respectivamente) na profundidade de 0,30-0,60 m

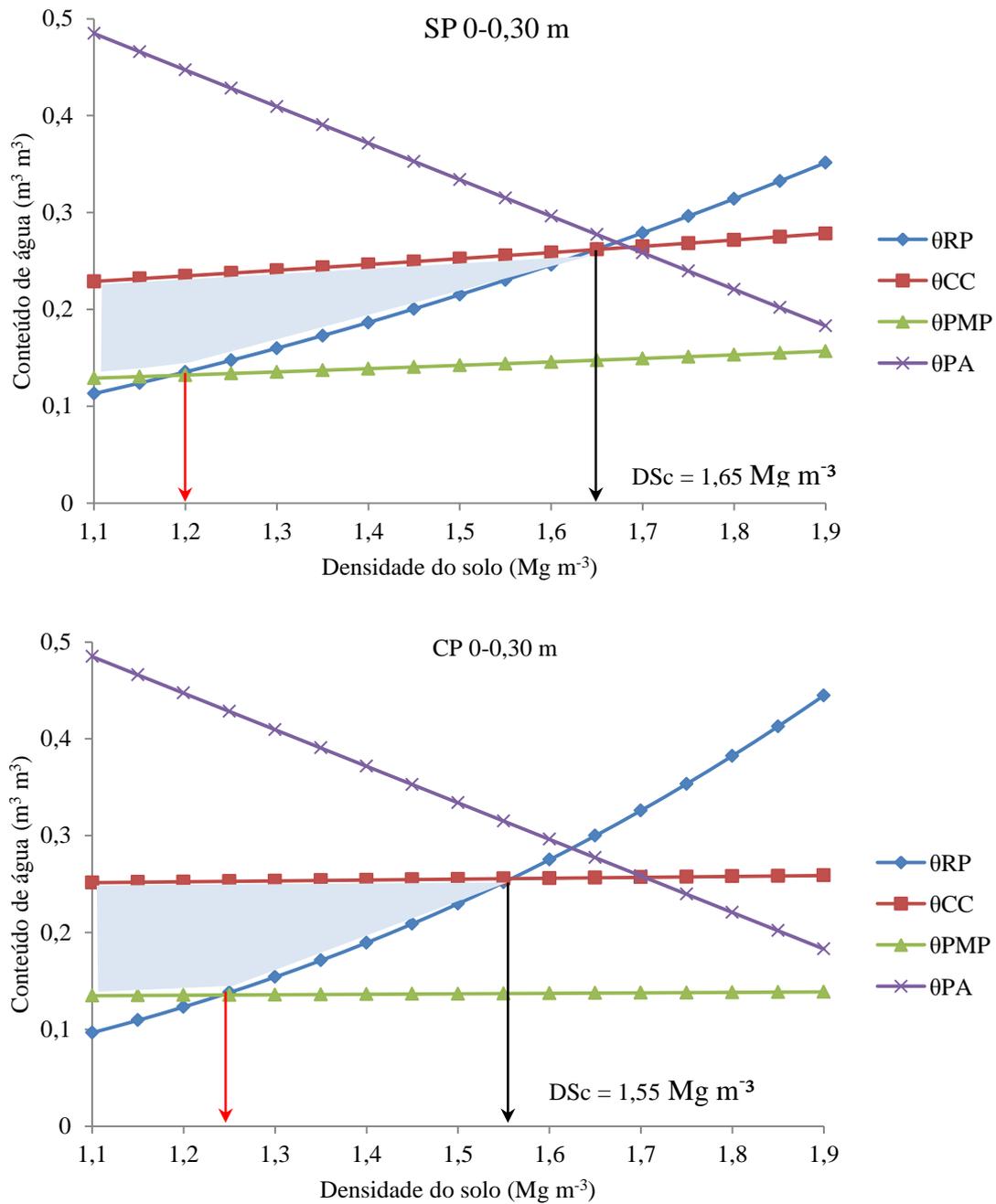


Figura 5. Intervalo hídrico ótimo no manejo com preparo (CP) e sem preparo (SP) mecanizado na profundidade de 0-0,30m

No entanto, observa-se também que o manejo mecanizado promoveu, sob menores densidades, até $\cong 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, que o IHO se equivalesse a água disponível (AD), tradicionalmente calculada como: $AD = CC - PMP$, de acordo com Viehmeyer e Hendrickson (1927); enquanto que, no manejo sem preparo, esta coincidência ocorreu só até a densidade de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$.

Este fato é comum em solos com qualidade física adequada, onde o IHO corresponde à AD, tendo-se como limite superior do IHO a θ_{CC} e o inferior a θ_{PMP} , como observado por Silva et al. (2002).

Porém, no presente estudo, esta equivalência ocorre numa faixa muito estreita de DS (de 1,10 a 1,25 Mg m^{-3} , no manejo CP; e de 1,10 até 1,20 Mg m^{-3} , no SP). A partir desses valores, embora o limite superior não mude com o aumento da DS, o IHO é diminuído quando, no limite inferior, a RP substitui a θ_{PMP} , até que a máxima DS promova a não disponibilidade de água às plantas, quando o IHO é nulo.

Neste contexto, o solo em estudo já apresentava qualidade física natural inadequada ao cultivo de plantas, pois, mesmo antes da implantação do experimento, a DS na camada superficial já era alta (1,55 Mg m^{-3} , Tabela 1), cujo valor está abaixo do limite crítico no qual o IHO é nulo (1,65 Mg m^{-3}).

Essa diferença reflete o comportamento da curva da θ_{RP} do solo cultivado sem mecanização (SP), que apresentou um ângulo mais agudo em relação ao eixo X (θ_{RP} , Figura 5). Pacheco e Cantalice (2011) também observaram, para a mesma classe de solo do presente estudo, que em áreas cultivadas com cana-de-açúcar a RP foi o principal fator restritivo ao crescimento radicular.

Para a camada 0,30-0,60 m o intervalo hídrico ótimo apresentou DSc de 1,55 Mg m^{-3} , para o manejo com preparo do solo; e de 1,50 Mg m^{-3} , para o manejo sem preparo do solo.

Assim, com relação às diferenças entre a DS natural e a crítica (estimada via modelo, na qual o IHO é nulo) o comportamento da camada 0,30-0,60 m foi muito similar à da superficial. De fato, no manejo onde não houve preparo do solo, a RP foi mais limitante, corroborando os resultados observados por Pacheco e Cantalice (2011).

A maior limitação devido à RP do solo SP pode ser atribuída às variações espaciais dos atributos físicos como densidade do solo, promovida pelo tráfego de máquinas durante o plantio da cana-de-açúcar, conforme observado por Sá et al. (2016). Nesta camada, observa-se que o preparo do solo realizado com a subsolagem contribuiu para que a DSc fosse maior, o que é um fato positivo.

Isto comprova que a subsolagem, quando realizada isoladamente, é mais efetiva na melhoria dos atributos físico-hídricos dos solos, como o IHO, do que quando esta prática foi associada à gradagem, como ocorreu na camada superficial.

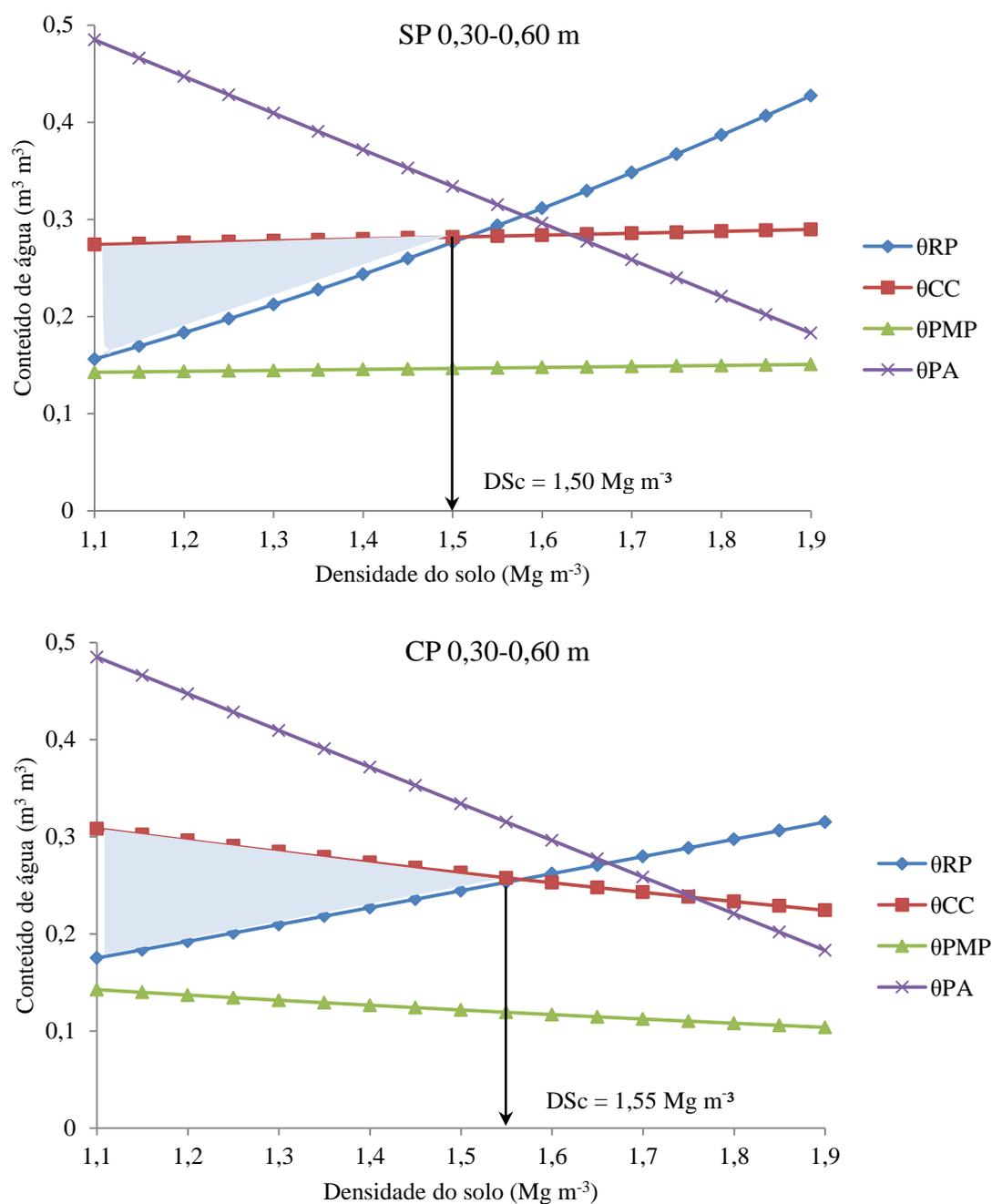


Figura 6. Intervalo hídrico ótimo no manejo com preparo (CP) e sem preparo (SP) mecanizado, na profundidade de 0,30-0,60m

Os parâmetros de ajuste da equação de Ross et al. (1991) confirmaram que não houve diferenças estatísticas na camada superficial (Tabela 3). No entanto, para a camada subsuperficial, houve diferenças significativas, por meio do intervalo de confiança (0,95), para o parâmetro “a”.

Tabela 3. Parâmetros de ajuste da equação: $\theta = \exp(a+bDS)\Psi^c$ para os sistemas de manejo adotados

Parâmetro	Com Preparo				Sem preparo			
	Coef. ⁽¹⁾	Valor de T	IC _{Inferior}	IC _{Superior}	Coef. ⁽¹⁾	Valor de T	IC _{Inferior}	IC _{Superior}
Camada 0-0,30 m								
a	-0,846	-5,247	-1,166	-0,528	-1,216	-8,692	-1,495	-0,939
b	0,036	0,334	-0,176	0,248	0,245	2,693	0,065	0,425
c	-0,125	-30,033	-0,133	-0,116	-0,115	-34,175	-0,121	-0,108
Camada 0,30-0,60 m								
a	-0,031	-0,190	-0,351	0,293	-0,769	-5,953	-1,028	-0,513
b	-0,398	-3,196	-0,642	-0,157	0,069	0,748	-0,114	0,253
c	-0,154	-29,828	-0,165	-0,143	-0,130	-31,461	-0,139	-0,122

⁽¹⁾ Coeficiente; IC: Intervalo de Confiança (0,95)

Esse parâmetro está relacionado à água disponível, ou seja, os limites entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Quanto mais negativo for o valor de “a” menor é a disponibilidade de água entre esses dois limites. Portanto, houve diferenças para esse parâmetro entre os manejos, com o preparo mecanizado apresentando valores maiores (menos negativos, mais próximos de zero). Esses dados permitem afirmar que, nas parcelas onde ocorreu o preparo do solo, houve mais água disponível entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

Para os demais parâmetros da equação de Ross et al. (1991) não houve diferença estatística entre os parâmetros. Os parâmetros “b”, para a camada superficial CP; “a”, na camada subsuperficial CP; e “b”, na camada subsuperficial SP, não foram significativos, uma vez que a amplitude entre os valores dos seus intervalos de confiança (IC), inferior e superior, passa pelo zero absoluto, conforme salientado por Glantz e Sliker (1990).

Essa flutuação nos valores dos IC dos parâmetros “b” denota que a inclusão da DS na equação proposta por Ross et al. (1991) para estimar a θ , no caso do manejo CP, na camada superficial, e SP na camada subsuperficial, não contribuiu para o resultado final da θ , sendo sua contribuição insignificante na referida equação, conforme também constatado por Bortolanza e Klein (2016).

Já para a equação de Busscher (1990), foram observadas diferenças estatísticas, por meio do intervalo de confiança (0,95), entre os parâmetros “f” da equação para os solos da camada superficial (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetros de ajuste da equação: $RP = d DS^e \theta^f$ para os sistemas de manejo adotados

Parâmetro	Com Preparo				Sem preparo			
	Coef. ⁽¹⁾	Valor de T	IC _{Inferior}	IC _{Superior}	Coef. ⁽¹⁾	Valor de T	IC _{Inferior}	IC _{Superior}
Camada 0-0,30 m								
d	0,001	1,393	0,000	0,005	0,000	1,722	0,000	0,001
e	7,792	7,888	5,758	9,874	7,532	12,237	6,305	8,785
f	-2,788	-10,496	-3,229	-2,358	-3,628	-15,215	-4,053	-3,246
Camada 0,30-0,60 m								
d	0,007	1,520	0,002	0,022	0,007	1,586	0,002	0,020
e	3,289	6,030	2,256	4,344	5,180	7,812	3,885	6,564
f	-3,060	-7,797	-3,831	-2,390	-2,814	-8,805	-3,440	-2,265

⁽¹⁾ Coeficiente; IC: Intervalo de Confiança (0,95)

Com o preparo do solo esse parâmetro obteve um valor maior (-2,788) que no manejo sem preparo (-3,628). Quanto mais negativo for o valor de “f”, mais a RP limita o IHO. Esses dados significam que no manejo SP, na camada superficial, a RP foi estatisticamente maior, limitando mais a disponibilidade de água, avaliada pelo IHO.

Para os demais parâmetros da equação de Busscher (1990), “d” e “e”, em ambas as profundidades, não houve diferenças estatísticas por meio dos seus IC, com relação ao preparo do solo.

Avaliando a contribuição da DS no ajuste da equação de Busscher (1990) para estimar a RP, pelo uso do parâmetro “d”, observa-se que o ajuste não foi significativo, em ambas as profundidades, pois os valores dos seus IC (inferior e superior) variam entre zero e 0,022 (GLANTZ; SLIKER, 1990).

A influência dos demais parâmetros (“e” e “f”) na estimativa da RP, apresentaram ajustes significativos. Os coeficientes “e”, positivos, indicam que, conforme ocorra aumento da DS, a RP tende a aumentar de forma proporcional, pelo efeito da compactação, que resulta em maior contato ou fricção interpartículas (Bortolanza e Klein, 2016). Para estes autores, os coeficientes “f”, negativos, indicam que a RP diminui com o aumento de θ . Possivelmente esse efeito se deve à lubrificação que a água promove entre as partículas da matriz do solo, reduzindo a coesão (TORMENA et al., 2007).

A Figura 7 apresenta o IHO na profundidade de 0-0,30 m para ambos os sistemas de manejo do solo; porém, avaliando a influência das doses de gesso em cada manejo nas duas profundidades avaliadas.

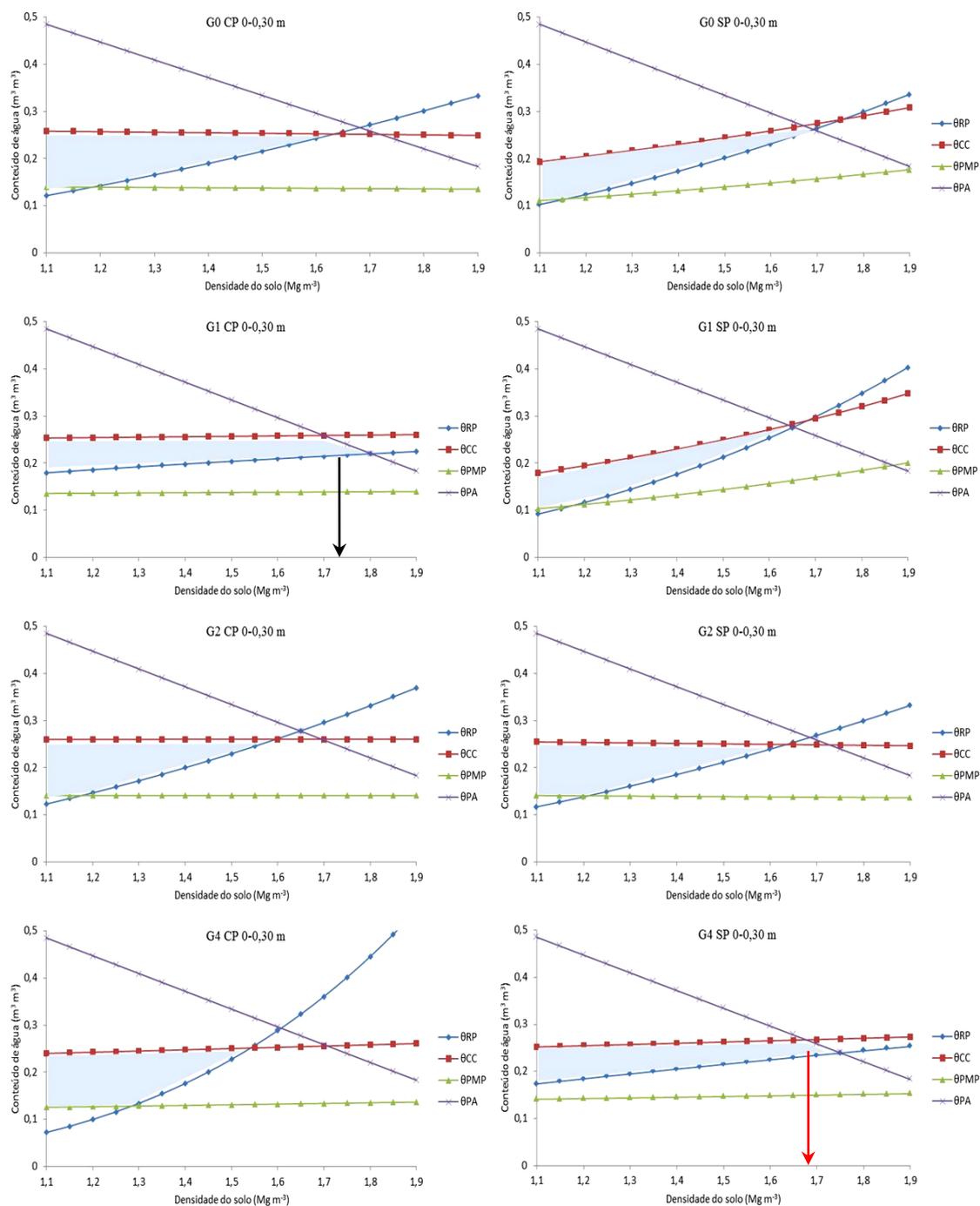


Figura 7. Intervalo hídrico ótimo em função das doses de gesso na camada 0-0,30 m

Observa-se que no manejo CP a dose de gesso que apresentou maior DSc foi a G1 (1 Mg ha⁻¹), com valores de 1,80 Mg m⁻³. No manejo SP a maior DSc foi de 1,75 Mg m⁻³ para a dose G4 (4 Mg ha⁻¹).

Em ambos os casos, os limites superior e inferior foram dados pela porosidade de aeração e resistência à penetração, que limitaram o IHO. Esses resultados são semelhantes aos

encontrados por Farias et al. (2013), que verificaram DSc de $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$, em Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar em Alagoas.

As substituições da θ_{CC} e θ_{PMP} pela θ_{PA} e θ_{RP} , como limites superior e inferior, respectivamente, na estimativa da disponibilidade de água do solo às plantas, comprovam que os solos estão com sua qualidade físico-hídrica inadequada para o crescimento pleno da cultura, como relatado por Silva et al. (2002).

Neste sentido, o cálculo da disponibilidade de água, utilizando o IHO, é mais efetivo em demonstrar as limitações reais que os solos impõem ao desenvolvimento das plantas, do que simplesmente avaliá-la pelo uso de apenas dois parâmetros, como sugerido por Viehmeyer e Hendrickson (1927), no conceito tradicional de disponibilidade de água às plantas ($AD = CC - PMP$).

De fato, Tormena et al. (1998) comentam que o IHO incorpora, em um único dado, as limitações associadas à disponibilidade hídrica para o desenvolvimento de plantas por meio da umidade mínima de aeração, umidade na qual a resistência à penetração atinge o limite crítico e potencial matricial do solo.

Possivelmente, na camada superficial, os efeitos do gesso são indiretos, devido à melhor distribuição radicular e, conseqüentemente, maior agregação do solo pelo efeito dos exsudatos radiculares (ANIKWE et al., 2016).

Na camada subsuperficial (Figura 8) no manejo CP as doses G1 e G2 (1 e 2 Mg ha^{-1} , respectivamente), apresentaram DSc muito próximas ($\cong 1,68 \text{ Mg m}^{-3}$ e $\cong 1,65 \text{ Mg m}^{-3}$), ambas limitadas pela θ_{PA} e θ_{RP} .

No manejo SP, a dose controle (G0) apresentou o maior valor de DSc ($\cong 1,62 \text{ Mg m}^{-3}$), limitada pela θ_{CC} e θ_{RP} , tendo menores valores para as demais doses de gesso. Este fato, associado à forma de aplicação do gesso na área SP (à lanço, em superfície), comprova que o gesso somente foi efetivo na melhoria dos atributos físico-hídricos do solo, quando este foi aplicado simultaneamente com o manejo mecanizado (neste caso, grade + subsolagem).

Portanto, pode-se concluir que a incorporação do gesso em profundidade pela ação do subsolador, promoveu a ampliação dos valores da DSc, fato positivo, já que o IHO só será nulo em faixas mais altas de DS.

Quimicamente, no manejo CP, possivelmente, o gesso atuou como agente flocculante em profundidade, melhorando a agregação do solo e, conseqüentemente, os seus atributos físicos usados na construção do IHO, como DS e RP.

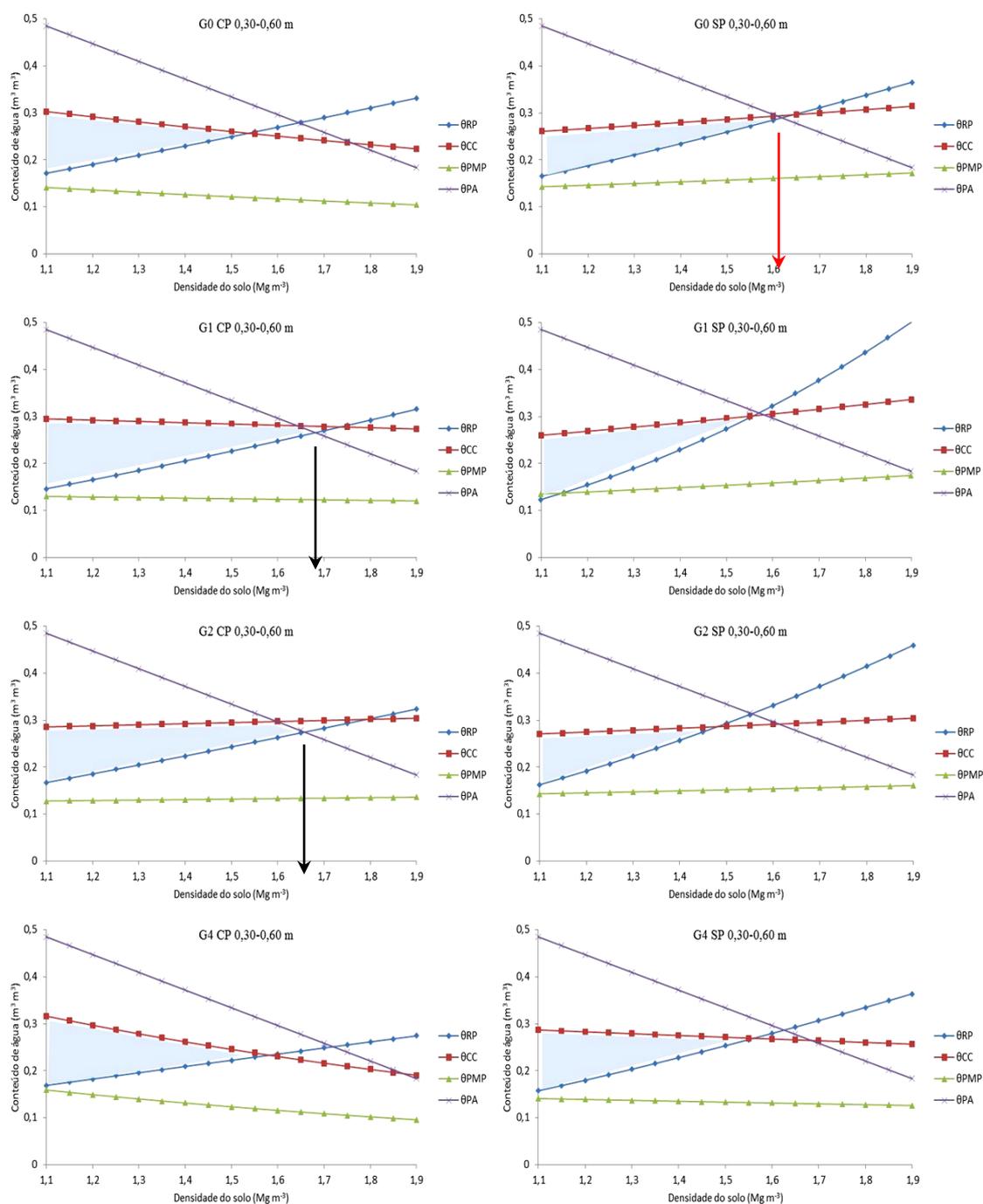


Figura 8. Intervalo hídrico ótimo em função das doses de gesso na camada 0,30-0,60m.

Esses dados divergem com os obtidos por Nogueira et al. (2016), que não verificaram influência do gesso residual na RP e DS quando aplicada a dose de 2 Mg ha^{-1} de gesso. As diferenças entre os resultados obtidos pelo presente estudo e os de Nogueira et al. (2016) podem ser atribuídas às classes de solos utilizadas nos distintos trabalhos. Desse modo, o Latossolo, utilizado por aqueles autores apresentaram maior teor de argila ($400,4 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparado ao Argissolo Amarelo Distrocoeso ($323,2 \text{ g kg}^{-1}$), classe de solo utilizado nesta pesquisa.

Com relação aos efeitos da gessagem nos atributos da planta utilizados para quantificar a produtividade da cana-planta, nota-se que as doses G1 e G2 foram as que mais contribuíram para os melhores valores de produtividade de colmos da cana-planta, sendo a dose de 2 Mg ha⁻¹ a mais recomendada (Tabela 4).

Tabela 4. Produtividade de colmos no manejo com preparo (CP) e sem preparo (SP) do solo em função das doses de gesso aplicadas no ciclo da cana-planta

Gesso	Produtividade de colmos (Mg ha ⁻¹)		
	CP	SP	Média (G)
0	159,70	154,16	156,93 b
1	162,83	158,63	160,73 ab
2	172,10	175,94	174,01 a
4	149,16	158,57	153,87 b
Média (P)	160,95	161,83	—
CV P (%)		7,47	
CV G (%)		6,76	

CP: Com preparo do solo; SP: Sem preparo do solo; P: Preparo; G: Gesso; CV: Coeficiente de Variação; Médias seguidas de mesma letra não diferem de si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No entanto, a dose G2, com 2 Mg ha⁻¹, não diferiu estatisticamente da dose G1, com 1 Mg ha⁻¹, obtendo-se produtividade de colmos de 172,1 e 162,83 Mg ha⁻¹, respectivamente. Oliveira et al. (2011) obtiveram maiores produtividades de colmo, trabalhando na mesma área e cultivar, em sistema irrigado, alcançando 186 Mg ha⁻¹.

Esses resultados permitem inferir que a produtividade pode estar associada às condições físico-hídricas do solo, onde a maior DSc, apontada pelo IHO, obtida com a dose de 1 e 2 Mg ha⁻¹, promoveu maior produtividade de colmos na cultura da cana-de-açúcar, nas condições utilizadas neste trabalho.

5.4 Conclusões

1. A subsolagem é mais efetiva em ampliar a faixa da densidade crítica do solo quando utilizada isoladamente.
2. A dose 2 Mg ha⁻¹ de gesso melhorou os atributos físico-hídricos do solo, com maior disponibilidade de água às plantas, pelo aumento da densidade crítica do solo, quando preparado com subsolagem.

3. A melhoria nos atributos físico-hídricos do solo devido a aplicação de 2 Mg ha⁻¹ de gesso aumentou a produtividade de colmos da cana-planta.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements** [internet]. Rome: FAO; 1998, [acesso em: 8 nov 2016]. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>.
- ALMEIDA, B.G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Piracicaba, 2008. 103p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.
- ANIKWE, M.A.N.; EZE, J.C.; IBUDIALO, A.N. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.158, n.2, p.32-38, 2016.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.5, p.787-794, 2006.
- BILIBIO, W.D.; CORRÊA, G.F.; BORGES, E.N. Atributos físicos e químicos de um Latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.4, p.817-822, 2010.
- BORTOLANZA, D.R.; KLEIN, W.A. Soil Chemical and Physical Properties on an Inceptisol after Liming (Surface and Incorporated) Associated with Gypsum Application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.40, n. e0150377, p.1-13, 2016.
- BORTOLUZZI, E.C.; SILVA, V.R.; PETRY, C.; CECCHETTI, D. Porosidade e retenção de água em um Argissolo sob manejo convencional e direto submetido a compressões unidimensionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1447-1457, 2008.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.33, n.4, p.519-524, 1990.
- CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.3, p.213-223, 2001.
- CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2016/17 [internet]. Brasília,DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; 2016 [acesso em: 8 nov 2016], Disponível em :

http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_18_14_27_15_boletim_cana_p_ortugues_-_1o_lev_-_16.pdf.

CORRÊA, J.C. Efeitos de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.2, p.203-209, 2002.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L.; GARCIA, C.J.B.; DUENHAS, L.H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.1, p.1-11, 2008.

DANE J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 4. Physical methods. Madison: American Society of Agronomy. (Soil Science Society of America Book Series, 5). 2002. 1692 p.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. **Pressure plate extractor**. In J. H. Dane e G. C. Topp (Eds.) SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 688–690). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

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

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**, 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FARIAS, I.F.; PACHECO, E.P.; VIÉGAS, P.R.A. Characterisation of the optimal hydric interval for a Yellow Argisol cultivated with sugarcane on the coastal plains of Alagoas, Brazil. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.44, n.4, p.669-675, 2013.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. **Particle density**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 229-240). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002a.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. **Porosity**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 241-254). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002b.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P.; PERES, F.S.C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II - Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.805-818, 2009.

GEE, G. W.; OR, D. **Particle size analysis**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 255-293). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

GHELLER, A.C.A.; MENEZES, L.L.; MATSUOKA, S.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H.P.; ARIZONO, H.; GARCIA, A.A.F. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. 1 ed. Araras-SP: UFSCAR, 1999.

GLANTZ, S.A. e SLIKER, B.K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York, McGraw-Hill, 1990. 777p.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. **The solid phase**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 201-415). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.

INAGAKI, T.M.; SÁ, J.C.M.; CAIRES, E.F.; GONÇALVEZ, D.R.P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.231, n.1, p.156-165, 2016.

JORGE, R.F.; CORÁ, J.E.; BARBOSA, J.C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um Latossolo Vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.6, p.1831-1840, 2010.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.6, p.959-964, 2000.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005.

MORELLI, J.L.; DALBEN, A.E.; ALMEIDA, J.O.C.; DEMATTÊ, J.L.I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um Latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.16, n.1, p.187-194, 1992.

NOGUEIRA, K.B.; ROQUE, C.G.; BORGES, M.C.R.Z.; TROLEIS, M.J.B.; BARRETO, R.F.; OLIVEIRA, M.P. Atributos físicos do solo e matéria orgânica sob dois manejos e efeito residual da aplicação de calcário e gesso agrícola. **Revista de la Facultad de Agronomía**, La Plata, v.115, n.1, p.45-54, 2016.

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

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.403-415, 2011.

- RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC. 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- REYNOLDS, W.D., e ELRICK, D.E. (2002). **Constant head well permeameter (vadose zone)**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp. 844-858). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc.
- RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.4, p.1167-1175, 2007.
- ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. **Suction table**. In J.H. Dane e G.C. Topp (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods (pp.692-698). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. 2002.
- ROSS P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equation for extending water-retention curves to dryness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.4, p.923-927, 1991.
- 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 o uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1610-1622, 2016.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 3 ed. Rio de Janeiro:Embrapa Solos, 2013.
- SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; LIMA, J.F.W.F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p.833-842, 2005.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science of Society America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V.A. **Indicadores da qualidade física do solo**. In van LIER, Q.J. Física do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.p.241-282.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. **Intervalo hídrico ótimo**. In: MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L. e FOLONI, J.S.S. Qualidade física do solo: Métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal, FUNEP, 2002. p.1-20.
- SILVA, E.J.; SILVA, P.C.C.; AMORIN, F. F.; BRITO, R.B.F.; PAMPONET, B.M.; REZENDE, J.O. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo distrófico coeso e crescimento radicular de *Brachiaria decumbens* submetido à subsolagem e fertilização. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.6, n.4, p.385-395, 2015.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.311-317, 1998.

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

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Survey Manual**. Washington: Soil Conservation Service - United States Department of Agriculture, 1998.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos Cerrados**. Planaltina, Embrapa-CPAC, 1995, 20p. (EMBRAPA-CPAC, Circular Técnica, 32).

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

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p. 211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science of Society America Journal*, Madison, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

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

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**, Rockville, v.2, n.1, p.71-78, 1927.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ferramentas geoestatísticas utilizadas possibilitaram a identificação da estrutura de dependência espacial e os mapas de krigagem, possibilitando a identificação da distribuição espacial dos atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar. A densidade amostral permitiu o conhecimento do número mínimo de amostras para caracterizar os atributos físicos do solo e produtividade da cultura, possibilitando subsidiar em trabalhos futuros para a região no mesmo tipo de solo, em que a densidade amostral mínima para estimar a resistência do solo à penetração de raízes foi de 11 amostras por hectare enquanto que a produtividade da cana-de-açúcar foi de 14 amostras por hectare.

Os sistemas de manejo do solo e a aplicação de corretivos como o gesso agrícola contribuem com essa variabilidade dos atributos físicos do solo. As doses de gesso quando aplicadas com gradagem e subsolagem reduziram a resistência tênsl dos agregados do solo. A sua resistência à penetração foi influenciada pelo preparo do solo, apresentando menores valores nas parcelas mecanizadas. O preparo do solo com gradagem + subsolagem foi eficiente em aumentar os teores de gesso em profundidade.

A subsolagem foi mais efetiva em ampliar a faixa da densidade crítica do solo quando utilizada isoladamente. A dose 2 Mg ha^{-1} de gesso melhorou os atributos físico-hídricos do solo, com maior disponibilidade de água às plantas, pelo aumento da densidade crítica do solo, quando preparado com subsolagem. A melhoria nos atributos físico-hídricos do solo devido a aplicação de 2 Mg ha^{-1} de gesso aumentou a produtividade de colmos da cana-planta.