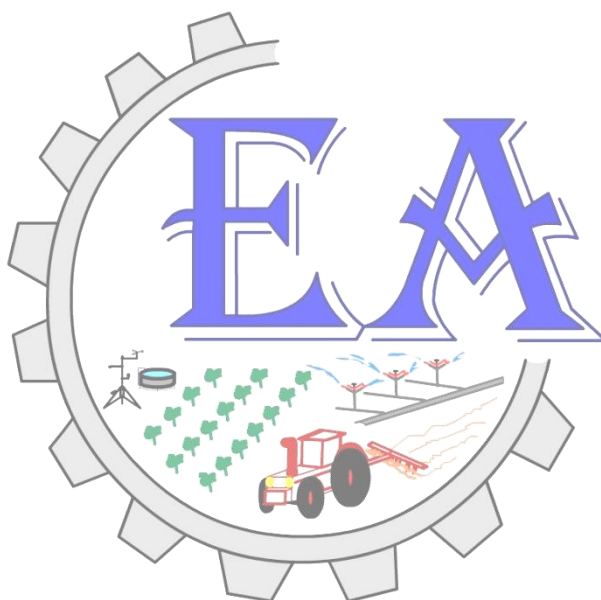




UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Renato Lima Ramos

ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS
E CARGAS APLICADAS NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO



JUAZEIRO/BA

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Renato Lima Ramos

ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS
E CARGAS APLICADAS NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Colegiado de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Alan Christie da Silva Dantas

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez

JUAZEIRO-BA
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FOLHA DE APROVAÇÃO


Renato Lima Ramos

ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DO TRAFEGO DE
VEÍCULOS E CARGAS APLICADAS NOS ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação *Strito Sensu* em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.



Prof. Dr. Alan Christie da Silva Dantas, Prof. DSc.
Univasf/CPGEA



Prof. Dr. Marlon da Silva Garrido, Prof. DSc.
Univasf/CPGEA



Prof. Dr. José Bismark de Medeiros, Prof. DSc.
Univasf/CENMEC

Juazeiro-BA, 30 de Julho de 2014.

L732e

Lima, Renato Ramos.

Estudo comparativo do efeito do tráfego de veículos e cargas aplicadas nos atributos físicos do solo / Renato Ramos Lima. -- Juazeiro, 2014. 56f. : il. ; 29 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Alan Christie da Silva Dantas

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez.

1. Solo - uso. 2. Argissolo. 3. Máquinas agrícolas I. Título. II. Dantas, Christie da Silva Dantas. III. Cortez, Jorge Wilson. IV. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

CDD 631.47

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF

Dedico esta dissertação a meus pais:
Roberto Pereira Ramos e Josefa Maria
Lima Ramos

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor nosso Deus que sempre oferece o melhor para nós, e mesmo assim, em muitas vezes reclamamos de nossas vidas. Nada acontece sem a permissão de Deus, cabe a nós entendermos e crer que o melhor para nós irá acontecer no momento certo que é o tempo de Deus.

Meus pais, se hoje concluo mais uma etapa em minha vida é porque meus pais me ajudaram, me deram apoio, me animaram e me incentivaram. E eles sabem que estarei com eles em todos os momentos, pois nunca os abandonarei.

A Renata, Roberta e Renan, meus irmãos que contribuíram comigo e que me apoiam.

A meus avos, tias e tios que me ajudaram nessa caminhada.

Aos meus amigos que me ajudaram e me incentivaram nessa caminhada, e em especial a Fernando, amigo de verdade.

A meus orientadores professores Dr. Alan Christie da Silva Dantas e Dr. Jorge Wilson Cortez pelos ensinamentos repassados para mim.

A equipe Baajatinga na pessoa de Valmir Alves Bezerra Júnior pelo grande auxílio na concepção desta dissertação.

A Hideo de Jesus Nagahama pela ajuda no experimento.

A minha esposa Rafaela que nesses últimos meses dividiu comigo a escrita dessa dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade.

A CAPES pela concessão da bolsa.

RAMOS, R. L. **Estudo comparativo do efeito do tráfego de veículos e cargas aplicadas nos atributos físicos do solo**. 2014. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Juazeiro-BA.

RESUMO

A utilização de máquinas agrícolas pode causar consideráveis impactos sobre os atributos físicos do solo, ocasionando problemas que podem diminuir a produtividade das culturas. O uso de tratores de menor porte no processo produtivo pode ser alternativa para diminuição dos efeitos da compactação no solo. O objetivo foi avaliar os efeitos causados pelo tráfego de três veículos (baja, trator agrícola e quadriciclo) associados a níveis de carga (0, 2, 4 e 6 passadas) sobre a densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e resistência à penetração (RP) de um Argissolo Amarelo distrófico no semiárido nordestino. O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas com quatro repetições (4 blocos). As menores mudanças nos atributos do solo foram verificadas pelo uso dos veículos baja e quadriciclo. O trator agrícola apresentou as maiores mudanças nos atributos do solo apresentando valores críticos nos atributos densidade, porosidade, macroporosidade e microporosidade. O nível de carga com quatro passadas nas camadas superfícies (0,00-0,20 m) e seis passadas nas camadas mais profundas (0,20-0,40 m) provocou maiores alterações sobre os atributos do solo. Os valores de resistência à penetração do perfil do solo ficaram abaixo do limite crítico para os tratamentos.

Palavras-chave: compactação do solo, tráfego de máquinas, mecanização agrícola

RAMOS, R. L. **Comparative study of the effect of vehicle and traffic loads applied on soil physical properties**. 2014. 56f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering), Federal University of São Francisco Valley, UNIVASF, Juazeiro-BA.

ABSTRACT

The use of agricultural machinery can cause considerable impacts on the physical attributes of the soil, causing problems that can reduce crop productivity. The use of smaller-sized tractors in the production process can be alternative to decrease the effects of compaction on soil. The objective was to evaluate the effects caused by the traffic of three vehicles (baja, agricultural tractor and ATV) associated with load levels (0, 2, 4 and 6 passed) on the density, total porosity, macroporosity, microporosity and resistance to penetration (RP) a Yellow in dystrophic Argisols Northeastern semi-arid region. The delineation used was randomized blocks with sub-divided plots with four replicates (4 blocks). The smallest changes in the attributes of the soil has been verified by the use of baja vehicles and ATV. Agricultural tractor presented the biggest changes in the attributes of the soil showing critical values in the attributes density, porosity, macroporosity, microporosity. The charge level with four passed the layers surfaces (0.20 m) and six passed in the deepest layers (0.20 -0.40 m) caused major changes about the attributes of the soil. The values of resistance to penetration of the soil profile remained below the critical limit for the treatments.

Keywords: soil compaction, machinery traffic, agricultural mechanization

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Croqui da área experimental com a disposição das parcelas e subparcelas.	27
Figura 2. Esquema para coleta de dados pontual e de perfil	29
Figura 3. Mapas de isolinhas do Baja para RP de perfil (MPa) em função das cargas: a) 2 passadas, b) 4 passadas e c) 6 passadas.....	42
Figura 4. Mapas de isolinhas do Quadriciclo para RP de perfil (MPa) em função das cargas: a) 2 passadas, b) 4 passadas e c) 6 passadas.....	43
Figura 5. Mapas de isolinhas do Trator para RP de perfil (MPa) em função das cargas: a) 2 passadas, b) 4 passadas e c) 6 passadas.....	44

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela 1. Composição granulométrica, umidade do solo no momento da coleta dos dados, capacidade de campo e ponto de murcha permanente do Argissolo Amarelo.....	25
Tabela 2. Dados dos pneus, área de contato e pressão estimada aplicada pelos rodados dos veículos utilizados no experimento.....	27
Tabela 3. Densidade (Ds) para cada camada de solo em função dos veículos (V) e das cargas (C).....	31
Tabela 4. Interação entre veículos (V) e cargas (C) para densidade do solo.....	33
Tabela 5. Porosidade total para cada camada de solo, em função dos veículos (V) e das cargas (C).....	35
Tabela 6. Desdobramentos da interação entre veículos (V) e cargas (C) para porosidade total do solo.	36
Tabela 7. Macroporosidade do solo em função do tráfego de veículos (V) e das cargas aplicadas (C).	37
Tabela 8. Desdobramentos da interação entre tráfego de veículos (V) e cargas aplicadas (C) para macroporosidade.	38
Tabela 9. Microporosidade do solo em função do tráfego de veículos (V) e das cargas aplicadas (C).	39
Tabela 10. Desdobramentos da interação entre tráfego de veículos (V) e cargas aplicadas (C) para microporosidade.....	40
Tabela 11. Resistência à penetração do solo (RP) em função do tráfego de veículos (V) e das cargas aplicadas (C).....	40
Tabela 12. Dados do semivariograma para a resistência mecânica do solo à penetração (RP) em função das cargas (passadas) e veículos.	41

SUMÁRIO

	Páginas
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Compactação do solo e seus efeitos sobre a agricultura	14
3.2 Efeitos da compactação do solo sobre algumas culturas.....	16
3.3 Efeitos do tráfego de máquinas nas propriedades físicas do solo	17
3.3.1 Densidade do solo	17
3.3.2 Porosidade do solo	18
3.3.3 Resistência do solo à penetração	19
3.4 Utilização de Minitradores	21
3.5 Geoestatística	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 Local.....	25
4.2 Delineamento experimental.....	26
4.3 Atributos do solo	28
4.4 Análise dos dados.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1 Densidade do solo.....	31
5.2 Porosidade total do solo.....	34
5.3 Macroporosidade	36
5.4 Microporosidade.....	38
5.5 Resistência mecânica do solo à penetração (RP).....	40
5.5.1 Análise de resistência à penetração no perfil do solo	41
6. CONCLUSÕES.....	45
7. REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Os processos agrícolas modernos têm exigido máquinas de porte cada vez maiores para suprir as necessidades da agricultura, devido o maior requerimento de potência, ao mesmo tempo em que o uso do solo tornou-se mais intenso, ocasionando sensíveis modificações nas suas propriedades físicas (STRECK et al., 2004).

O tráfego de máquinas propicia a incidência de cargas, ocasionando tensões nas áreas de contato entre solo/pneu e solo/implementos agrícolas, o que promove modificações estruturais na camada do solo (SILVA et.al., 2003). Nas linhas de tráfego ocorre sensível aumento na densidade do solo, em conjunto com a redução da porosidade, macroporosidade, aumento da microporosidade, resistência à penetração do solo e minimização da condutividade hidráulica (LOWEY & SCHULER, 1994; ALAKUKKU & ELOMEN, 1995; BALL et al. 1997). Quanto maior a incidência de cargas sobre o solo, mais pronunciadas serão as modificações em seus atributos físicos, de forma que os efeitos são acumulativos. No entanto Fenner (1999) constatou que a primeira passagem da máquina foi a que ocasionou os maiores níveis de deformação do solo.

O solo submetido ao intenso tráfego de máquinas em condições de umidade elevada é mais propenso à degradação física (FLOWERS & LAL, 1998), pois modifica a estrutura (CORRÊA, 2002). Em virtude da compactação do solo, os macroagregados são minimizados, degradando a estrutura física, de forma que se torna mais denso, ao mesmo tempo em que pode apresentar maior resistência à penetração de raízes, proporcionando menor volume de solo a ser explorado pelo sistema radicular (TAVARES FILHO et al. 1999).

Os solos compactados apresentam maiores valores de densidade e resistência à penetração, enquanto porosidade, continuidade de poros, permeabilidade e disponibilidade de nutrientes e água sofrem reduções, em decorrência disso, estão sujeitos as maiores perdas devido à erosão, minimização do crescimento e desenvolvimento radicular, além de maior necessidade de gastos com combustível a ser utilizado no preparo do solo (TAVARES FILHO et al., 2001; STRECK et al., 2004). Sidiras e Vieira (1984) observaram em seu estudo sobre os efeitos do tráfego de um trator agrícola durante a semeadura que a infiltração da

água foi reduzida e que o solo tornou-se mais denso nas linhas de tráfego. Assis & Lanças (2005) relatam que a germinação das sementes pode ser afetada devido à compactação da camada de semeadura, influenciando negativamente a produtividade da cultura.

A compactação do solo minimiza o crescimento das raízes das plantas, restringindo a área explorada pelo sistema radicular, dificultando a absorção de água e nutrientes vindo a prejudicar o desenvolvimento das plantas (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000). Hakansson et al. (1998) enfatizam que em solos compactados, o crescimento deficiente das raízes reduz o volume de solo explorado impactando diretamente na absorção de água e nutrientes. Em um estudo realizado por Freddi et. al. (2005), foi observado que os valores de densidade do solo e resistência à penetração obtidos nas áreas trafegadas foram mais elevados que os das áreas não submetidas ao tráfego de máquinas, sendo constatado na macroporosidade que teve seus valores reduzidos de $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solo não submetido a cargas para $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no solo exposto ao maior número de passadas.

Segundo Richard et al. (2001) os poros são provenientes da junção das partículas do solo, por sua vez, a compactação reduz a porosidade total e a macroporosidade enquanto aumenta os valores da microporosidade. A redução do volume de macroporos ocorre devido à fragmentação dos agregados, ocasionada pelos implementos de preparo do solo ou pela minimização dos espaços entre as partículas do solo em decorrência do tráfego de máquinas pesadas (BEUTLER et. al., 2005).

A utilização de tratores agrícolas é importante para o desenvolvimento da agricultura, no entanto, o uso inadequado promove cargas expressivas na interface solo/pneus e implemento/pneus, desta forma, faz-se necessário o estudo de alternativas como a utilização de máquinas que sejam funcionais e transmitam menores cargas ao solo. Neste trabalho avaliamos o potencial de um mini-tractor baseado na estrutura de um protótipo mini-baja, como um potencial candidato para a realização de operações agrícolas, mas que exigem baixos níveis de potência. O protótipo oferece a vantagem de ser construído na região do Vale do São Francisco e ter dimensões propícias ao uso em áreas plantadas com frutíferas, principal atividade econômica da região. Desta forma, o estudo dos impactos causados sobre o solo por este veículo, se constitui de grande importância.

2 OBJETIVO

O objetivo foi avaliar os efeitos causados pelo tráfego de três veículos (baja, um trator convencional e um quadriciclo) associados a níveis de carga sobre a densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e resistência à penetração de um Argissolo Amarelo distrófico no semiárido nordestino.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compactação do solo e seus efeitos sobre a agricultura

O solo não saturado quando submetido à compressão sofre compactação, esta promove mudanças nos seus atributos físicos dentre as quais se destacam o aumento da densidade e da resistência à penetração, redução da porosidade, aeração e permeabilidade do solo (STONE et al., 2002; SILVA et al., 2002b; COLLARES et. al., 2006). Afeta o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas, aumenta as perdas de nitrogênio por desnitrificação, consumo de combustível dos tratores no preparo do solo e erosão dos solos ocasionada pelo escoamento superficial em decorrência da menor infiltração de água (ABREU et.al., 2004; BEULTER & CENTURION, 2004).

Segundo (REICHERT et al. 2007), a mecanização é benéfica para o homem por agilizar e facilitar o seu trabalho, promovendo o aumento da produção, no entanto, o uso intensivo de tratores e implementos intensifica o desgaste dos atributos físicos do solo. Centurion e Demattê (1992) afirmam que a produtividade das culturas acaba sendo comprometida pelo uso intensivo de tratores e implementos desde o preparo do solo até a colheita. Deste modo a mecanização ocasiona a compactação do solo, minimizando sua produtividade biológica podendo o tornar impróprio para o crescimento de plantas (HILLEL, 1998). Devido à compactação, ocorre uma reorganização dos agregados na matriz do solo e a expulsão do ar em decorrência da redução da sua porosidade total (GUPTA & ALLMARAS, 1987), comprometendo a estrutura do solo o que pode vir a culminar com a redução do seu potencial produtivo (BEUTLER et al., 2006).

A utilização de máquinas cada vez mais pesadas devido à necessidade de atender as demandas da agricultura moderna acabou intensificando a compactação do solo. Em áreas agrícolas e de pastagens, é comum que a camada compactada esteja até uma profundidade máxima de 20 cm, no entanto, em áreas de floresta a camada compactada pode atingir maiores profundidades (REICHERT et al. 2007). Em solos compactados há uma redução da macroporosidade, modificando a quantidade e fluxo de água no solo, alterando a disponibilidade desta para as plantas. Solos com umidade inadequada para tráfego de máquinas são mais propensos à compactação. Como em áreas irrigadas a umidade está constantemente em capacidade de campo, o solo está torna-se mais suscetível à compactação (DIAS et.al., 2012).

Taylor e Brar (1991) afirmam que a compactação do solo ao afetar a estrutura do solo, consistência, porosidade total, número e tamanho de poros e difusão dos gases, também inibe o crescimento das raízes. Ao apresentar condições favoráveis de fluxo de água, calor e gases, o solo torna-se propício ao desenvolvimento adequado das plantas. Aeração, temperatura e resistência à penetração são controladas pela umidade, no entanto são influenciadas pela densidade do solo e distribuição do tamanho dos poros. Esses fatores são preponderantes para o crescimento das raízes, vindo a condicionar a produtividade dos cultivos (COLLARES et. al., 2006; STONE et al., 2002; MODOLO et al., 2008).

Com a compactação há um acréscimo na resistência à penetração e redução da porosidade total e macroporosidade, em consequência, a aeração, taxa de infiltração e condutividade hidráulica do solo são minimizadas, além disso, o escoamento superficial pode aumentar em detrimento da água disponível para as plantas, vindo a minimizar o crescimento das raízes (BEUTLER & CENTURION, 2003; REICHERT et al., 2007). A atividade bioquímica da planta é comprometida, inibindo o crescimento da parte aérea (TURNER, 1997) e a produção da cultura (BEUTLER & CENTURION, 2004a).

Segundo (REICHERT et al. 2007), mesmo que um solo compactado seja dotado de condições químicas favoráveis às plantas, estas não conseguem retirar todos os nutrientes disponíveis devido ao desenvolvimento das raízes estar prejudicado, pois é nas raízes que ocorre uma maior absorção de nutrientes. Queiroz-Voltan et.al.(2000) relatam que a compactação ao diminuir a aeração do

solo, minimiza a quantidade de oxigênio na região da rizosfera, podendo vir a prejudicar o desenvolvimento das plantas.

3.2 Efeitos da compactação do solo sobre algumas culturas

Em seu experimento, Silva et.al.(2000b) constataram que na camada de 10 - 25 cm em um solo Podzólico Vermelho- Amarelo, a densidade de raízes de milho apresentou comportamento inverso ao da densidade do solo. Silva (2003) relata que a densidade de comprimento radicular da soja foi semelhante entre o maior e o menor grau de compactação, sendo que a metade da densidade do comprimento radicular foi encontrada na camada de 0 - 7,5 cm em um Latossolo Vermelho distrófico.

Em um Latossolo Vermelho, a compactação ocasionada por 4 passadas de uma pá carregadeira ocasionou a concentração do sistema radicular do feijão na camada de 0-10 cm, além disso, na raiz principal foi observada a existência de varias ramificações nas primeiras camadas. A compactação do solo restringiu o crescimento do sistema radicular do feijoeiro, minimizando a sua área de captação de água e nutrientes, impactando diretamente no crescimento da parte aérea (COLLARES et.al., 2006).

Collares (2005) constatou que a compactação adicional ocasionada por 4 passadas de uma máquina de 10 t atenuou a altura do feijoeiro em 19,6 e 19,1 %, respectivamente quando comparada as plantas em áreas de plantio direto de 12 anos e escarificação, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico com 81 g kg⁻¹ de argila.

A cultura do milho teve seu crescimento aéreo reduzido em cerca de aproximadamente 20% quando cultivada em área que apresentava 1,4 MPa de resistência a penetração (FOLONI et.al., 2003). Merotto e Mundstock (1999) constataram que o crescimento das raízes de trigo plantado sobre Podzólico Vermelho-Escuro, foi reduzido quando a resistência à penetração (RP) estava entre 3,5 e 5,5 MPa. Silva e Rosolem (2001) observaram em seu experimento que com uma RP de 1,22 MPa, houve uma redução de 40% no crescimento aéreo do sorgo granífero ao termino de 38 dias de cultivo.

3.3 Efeitos do tráfego de máquinas nas propriedades físicas do solo

3.3.1 Densidade do solo

A intensificação da agricultura em conjunto com a falta de práticas agrícolas adequadas promove o desequilíbrio no solo, ocasionando considerável impacto sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas, assim, a área utilizada torna-se propensa a sensível declínio na sua capacidade de produção agrícola (RICHART et al., 2005). Determinadas práticas de manejo de solo e das culturas modificam suas propriedades físicas, o que pode culminar no comprometimento do potencial produtivo destes solos (LIMA, 2004).

Os impactos sobre o solo têm caráter acumulativo à medida que a atividade agrícola é intensificada na área, assim, fazendo-se necessário que sejam utilizadas práticas agrícolas que ocasionem as menores modificações possíveis sobre as propriedades do solo. Como exemplo, pode-se citar a mecanização agrícola, que traz benefícios para a agricultura quando utilizada de forma adequada, porém, seu uso indiscriminado pode submeter cargas excessivas ao solo vindo a degradá-lo (REIS et al., 2007). Segundo Camargo e Alleoni (1997), o uso indiscriminado de máquinas vem acentuado os problemas de compactação em solos agrícolas.

O desenvolvimento da agricultura que requer mais agilidade e eficiência em suas operações, em conjunto com o constante desenvolvimento da engenharia, culminou na concepção de máquinas e sistemas mais eficientes no preparo do solo e demais operações agrícolas (CUNHA et al., 2009). No entanto, o incremento de peso e potência proveniente dessa evolução pode ocasionar problemas ao solo como a compactação (ANSORGE & GODWIN, 2008). As pressões sobre o solo ocasionadas pelo tráfego de máquinas aumentam a densidade, minimiza a porosidade total e aumenta a resistência à penetração do solo, ocasionando problemas como dificuldades de infiltração da água no solo, redução do sistema radicular e conseqüente queda de produtividade das plantas (PACHECO & CANTALICE, 2011).

Dificuldades quanto ao desenvolvimento radicular das plantas, perdas de nitrogênio, uso de máquinas mais potentes e pesadas para o preparo do solo e erosão são alguns dos problemas ocasionados pela compactação (ABREU et al,

2004; SILVA et al., 2006; OLIVEIRA et al, 2010). Reichert et al. (2003), indicaram os seguintes valores de densidade crítica do solo para as respectivas classes texturais: 1,30 a 1,40 Mg m^{-3} para solos argilosos; 1,40 a 1,50 Mg m^{-3} para os franco-argilosos; 1,70 a 1,80 Mg m^{-3} para os franco-arenosos, 1,25 a 1,3 Mg m^{-3} para muito argilosos e 1,56 Mg m^{-3} para franco-siltosos.

Segundo Reichert et al.(2007), para obter a densidade crítica, relaciona-se a macroporosidade mínima de $0,10\text{m}^3\text{m}^{-3}$ com a densidade do solo. Genro Júnior (2002) constatou em seu experimento que essa macroporosidade correspondeu a uma densidade de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$, em um Latossolo Vermelho distroférico típico com 680 g kg^{-1} de argila. Secco et al. (2004) observaram uma densidade de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ em Latossolo Vermelho distroférico (427 g kg^{-1} de argila). Argenton et al. (2005) constataram uma densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, em sistemas de preparo convencional e reduzido em um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso (65 g kg^{-1} de areia, 265 g kg^{-1} de silte e 670 g kg^{-1} de argila).

3.3.2 Porosidade do solo

Segundo Marques (2000), os poros do solo são cavidades de diferentes tamanhos e formas, provenientes da disposição das partículas entre si. Tognon (1991) afirma que a porosidade do solo condiciona a aeração, retenção e condução da água, resistência à penetração, ramificação das raízes no solo, além do aproveitamento de água e nutrientes.

Othomer et al.(1991) relatam que os poros do solo são classificados em inter-agregados e poros intra-agregados. Os inter-agregados incluem macro e mesoporos, tendo como característica a rápida drenagem de água, sendo responsáveis pela aeração das raízes e drenagem de água do solo, já os intra-agregados compreendem uma faixa de diâmetro variando de $0,05 \text{ mm}$ a $0,0002 \text{ mm}$ e são responsáveis pela retenção de água no solo e disponibilização para as plantas, a água retida em poros menores de $0,0002 \text{ mm}$ não se encontra disponível para as plantas.

O uso intensivo de tratores e implementos em condições inadequadas tem contribuído diretamente com a compactação do solo, minimizando a porosidade total e macroporosidade do solo (BORGES et. al., 1997). Segundo Tavares Filho et al.

(1999), a redução da porosidade é um dos principais efeitos da compactação do solo. Oliveira et al. (2010) afirmam que quando da ocorrência de um acréscimo na densidade do solo, reduzi-se sua macroporosidade e aumenta-se a microporosidade, tornando-o mais resistente a penetração, minimizando a percolação e reduzindo a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas.

Os macroporos, também denominados de porosidade de aeração, têm grande importância no fluxo de gases no solo, desta forma, as alterações decorrentes da compactação do solo podem ser avaliadas através da análise da macroporosidade (VALICHESKI et. al., 2012). O valor de macroporosidade de $0,10\text{m}^3\text{m}^{-3}$ é considerado como o mínimo ideal para o desenvolvimento de plantas (GUPTA & ALLMARAS, 1987; SUZUKI, 2012).

Com a diminuição da macroporosidade, a água que fica retida nos microporos encontra-se sob altas tensões dificultando a sua absorção por parte das plantas (KERTZMANN, 1996). Streck et al.(2004) constatou que em decorrência do aumento do estado de compactação de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, a porosidade total e a macroporosidade diminuíram enquanto a microporosidade não sofreu aumento. Collares (2005) observou neste mesmo tipo de solo, que a compactação adicional ocasionada pelo tráfego de uma máquina de 10 t promoveu o aumento da densidade, enquanto ocasionou a redução da porosidade total e macroporosidade.

3.3.3 Resistência do solo à penetração

Os valores de resistência à penetração (RP) têm sido aceitos como indicativos de compactação devido a sua praticidade e rapidez na sua determinação. Além disso, a RP influencia diretamente o desenvolvimento das plantas e é mais eficiente que a densidade na determinação do estado de compactação do solo. No entanto, os valores de RP podem sofrer variações de acordo com a umidade do solo (SILVA et al., 2000b; FIGUEIREDO et al., 2000; IMHOFF et al., 2000; SILVA et al., 2003b; REINERT et al., 2007; SILVEIRA et al., 2010; VALICHESKI et. al., 2012).

Para determinar a resistência a penetração do solo em áreas compactadas utiliza-se penetrômetros. Dentre estes podemos destacar o penetrômetro de impacto (STOLF et al., 1983), seu funcionamento ocorre pela penetração de uma haste no

solo devido a uma força proveniente do impacto de uma massa que faz parte do equipamento e cai de uma altura determinada. Na coleta de dados anota-se a profundidade de penetração para cada impacto ocasionado. Depois disso, os dados são utilizados para determinar valores de pressão em MPa (STOLF, 1991).

Segundo Pedrotti et al. (2001), a resistência à penetração constata num perfil as camadas compactadas devido ao uso do solo, mensurando a dificuldade que este apresenta a algo que tente transpassa-lo, como uma raiz por exemplo. Segundo Materechera et al. (1992), o diâmetro das raízes aumenta quando estas se encontram em camadas compactadas, devido a alterações fisiológicas e morfológicas, exclusivas de cada espécie ou cultivar com o objetivo de se adaptarem ao meio em que se encontram. Russel e Goss (1974) relatam que solos resistentes à penetração estimulam as plantas a reduzirem o diâmetro das raízes para penetrar nos pequenos poros.

Hatano et al. (1988) afirmam que há um maior crescimento de raízes onde existe uma maior macroporosidade. Segundo Taylor e Brar (1991), devido às alterações na morfologia das raízes como a redução da divisão celular no meristema e aumento do diâmetro das raízes, ocorre uma diminuição da área explorada e consequente minimização da absorção de água e nutrientes.

Considerando o tipo de solo e espécie vegetal, a RP crítica varia de 1,5 a 4 MPa, sendo a resistência de 2,0 MPa aceita como referência de impedância ao crescimento do sistema radicular (Tormena et al., 1998). Segundo Sene et al. (1985), 6 MPa é considerado o limite de RP para solos arenosos, a partir do qual, ocorrem reduções significativas no crescimento radicular das plantas. Vepraskas e Miner (1986), afirmam que valores de resistência à penetração variando de 2,8 a 3,2 MPa minimizam o crescimento das raízes, enquanto com 4,0 MPa de resistência crescimento de raízes é paralisado. Segundo Pabin et al. (1998) uma redução de 40 % do sistema radicular é crítica à produtividade das plantas. Beutler e Centurion (2004) constataram aumento do diâmetro médio e da massa de matéria seca da raiz da soja, quando cultivada Latossolo Vermelho distrófico sob resistência a penetração de 2,07 e 1,99 MPa respectivamente.

Ao cultivar soja e arroz em Latossolo Vermelho distrófico típico textura média, foi constatada que suas produtividades foram reduzidas quando essas culturas foram submetidas à resistência a penetração de 1,66 e 2,22 MPa para soja e de 0,27 e 2,38 MPa para o arroz, respectivamente para os conteúdos de água de 0,11

kg kg⁻¹ (tensão de 50 kPa) e de 0,14 kg kg⁻¹ (tensão de 10 kPa), (BEUTLER et al., 2004).

Constata-se que os valores críticos de RP são diversos, variando de acordo com a planta utilizada no experimento, desta forma ainda são necessários novos estudos que visem à determinação de um valor crítico. O fator limitante é padronizar a umidade e os tipos de equipamentos utilizados na determinação da resistência a (REICHERT et al., 2007).

3.4 Utilização de Minitradores

Com o decorrer dos anos, a agricultura se modernizou em busca de uma melhor otimização nos seus processos produtivos. Em âmbito tecnológico, biológico e químico, ocorreu um grande desenvolvimento na agricultura mundial para suprir a demanda por alimentos. A busca por culturas mais produtivas e resistentes para atender a demanda mundial por alimentos também contribuiu com a modernização de equipamentos e máquinas direcionadas ao uso na agricultura moderna, dentre essas máquinas citamos os minitratores, estes tem potência de até 15 cv e são indicados para fruticultura, olericultura e horticultura.

Com a finalidade de atender os anseios da agricultura moderna, faz-se necessário que os produtores sejam capazes de extrair o melhor rendimento possível de suas propriedades, otimizando a produção e conferindo agilidade aos tratos culturais. Devido a sua funcionalidade, a utilização dos minitratores contribui para que esses anseios sejam atendidos, tendo em vista que estes podem trabalhar na adubação, plantio, pulverização e preparo do solo e serem utilizados no transporte de cargas. Por possuírem uma menor massa quando comparados a tratores de maior porte, estes possuem a vantagem de ocasionar menores cargas sobre o solo, promovendo menores modificações nos seus atributos físicos.

Esses tratores possuem outra grande vantagem, devido ao seu tamanho, eles podem trabalhar em varias operações dentro de plantios. Em seu experimento realizado dentro de estufa, Araujo et al. (2011) utilizaram um mini trator com enxadas rotativas no preparo do solo. Em fazendas produtoras de frutas, por exemplo, é comum à existência de diversas culturas como manga, uva, acerola, banana, dentre outras. Estas possuem espaçamentos diferentes entre fileiras o que

condiciona a entrada de tratores para execução de tratos culturais e colheita. Desta forma, a propriedade que possuir um minitrator terá uma maior facilidade nos tratos destas culturas.

O uso de tratores agrícolas é comum nestas plantações, onde são utilizados no preparo do solo (aragem, gradagem, nivelamento), roçagem, pulverização, transporte de frutas entre outras funções. Dentre estas operações, apenas o preparo do solo necessita de tratores de grande porte devido às grandes cargas exigidas. A roçagem, a pulverização e o transporte de frutas por sua vez exigem menores cargas de trabalho, justificando o desenvolvimento de tratores de menor porte adaptados a diferentes culturas.

Tratores de médio porte não conseguem locomover-se com boa agilidade entre as fileiras, prejudicando o processo de colheita e pulverização. O constante uso de tratores de médio e grande porte ocasiona a compactação do solo, que posteriormente, problemas de ordem física e química no solo, além de maior susceptibilidade ao processo erosivo. Com relação à agricultura familiar, os minitratores tem potencial para serem utilizados devido a sua funcionalidade e baixo custo quando comparados a tratores de médio e grande porte. Segundo Queiroga e Silva (2008), em São João do Sabugi-RN, produtores estão utilizando mini tratores na capina da lavoura de gergelim.

O agricultor que trabalha em pequenas áreas e não tem condições financeiras de possuir um trator de maior porte fica condicionado ao aluguel para fazer o preparo do solo e plantio, tornando-se dependente do equipamento de terceiros o que contraria a agricultura moderna que se caracteriza pela agilidade e otimização dos processos produtivos. Em seu estudo, Altieri et al.(2012), constataram que devido ao relevo e recursos, grande parte dos agricultores utilizavam animais ou minitratores para tração.

Comunidades rurais produtoras de frutas, hortaliças e milho entre outros cujos cultivos necessitam de aragem de solo que ainda é feita por tração animal, seriam extremamente beneficiadas caso recebessem minitratores, melhorando a execução dos tratos culturais e otimizando o trabalho em cada atividade, conferindo as famílias uma melhor qualidade de vida.

3.5 Geoestatística

Segundo Lamdim (1998) a geoestatística consiste na aplicação da teoria das variáveis regionalizadas para efetuar estimativas dentro de um contexto regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço ou no tempo, supondo que os valores das variáveis são correlacionados no espaço ou no tempo. Essa característica confere a geoestatística uma grande aplicabilidade nas estimativas e/ou simulações de variáveis em locais não amostrados.

O objetivo da geoestatística consiste em determinar as características estruturais do fenômeno regionalizante, ou seja, uma função da correlação ou da covariância entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado. O método de estimativa utilizado é o da krigagem. A krigagem faz estimativas das médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes por uma função denominada de semivariograma (LAMDIM, 1998).

Se uma variável regionalizada $x(i)$ for coletada em diversos pontos i , o valor de cada ponto estará relacionado com valores obtidos a partir de pontos situados a certa distância D_h e a influência será tanto maior quanto menor for à distância entre os pontos. O grau de relação entre pontos numa certa direção pode ser expresso pela covariância, sendo os pontos regularmente espaçados por múltiplos inteiros de D_h . Para uma distância D_h infinitamente pequena a covariância e a variância se tornam muito próximas, porém para D_h maiores, a covariância diminui enquanto a variância aumenta, ou seja, ocorre progressivamente maior independência entre os valores obtidos a distâncias cada vez maiores (LAMDIM, 1998).

Sendo $x(1), x(2), \dots, x(i), \dots, x(n)$, realizações de uma variável regionalizada, a estimativa não tendenciosa da semivariância é dada por $g(h) = 1/2n \sum \{x(i+h) - x(i)\}^2$. Tais relações são mostradas quando a função $g(h)$ é colocada em gráfico contra D_h para originar o semivariograma. Segundo Lamdim (1998), este expressa o comportamento espacial da variável regionalizada. Parâmetros do semivariograma estão relacionados abaixo:

- Amplitude (a), que indica a distância a partir da qual as amostras passam a não possuir correlação espacial e a relação entre elas torna-se aleatória; toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual à amplitude fornece informações sobre o ponto;

- Patamar ($C + C_0$), que indica o valor segundo o qual a função estabiliza-se no campo aleatório, correspondente à distância “a”; mostra a variabilidade máxima entre pares de valores, isto é, a variância dos dados e, conseqüentemente, covariância nula;
- Continuidade, pela forma do variograma, em que para $h=0$ $g(h)$ já apresenta algum valor. Esta situação é conhecida como efeito pepita e é representada por C_0 ; o efeito pepita pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos, para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo.
- Anisotropia, quando os semivariogramas se mostram diferentes para diferentes direções de linhas de amostragem.

A krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos. Nessa situação o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimativa, o que o distingue dos demais algoritmos à disposição. É entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. Dentre os métodos de estimativas, comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem pode ser considerado como o melhor estimador linear sem viés, cuja meta é a minimização da variância da estimativa e com erro residual médio igual a zero (LAMDIM, 1998).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local

A pesquisa foi realizada na Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus de Ciências Agrárias em Petrolina – PE. As coordenadas geográficas do local são latitude de 09°19'26" sul, longitude 40°33'36" oeste e altitude de 393 m. Segundo a classificação de Köppen, o clima desta área apresenta-se como tropical semiárido, tipo BshW, caracterizado pela escassez e irregularidades das precipitações com chuvas no verão e forte evaporação em decorrência das altas temperaturas. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico típico (AMARAL et al., 2006), textura arenosa. Os dados granulométricos, a umidade do solo na coleta dos dados, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Composição granulométrica, umidade do solo no momento da coleta dos dados, capacidade de campo e ponto de murcha permanente do Argissolo Amarelo.

Profundidade	Argila	Areia	Silte	Umidade de coleta	Capacidade de Campo	Ponto de Murcha Permanente
m	kg kg ⁻¹			kg kg ⁻¹		
0,00-0,10	0,090	0,878	0,032	0,0690	0,1072	0,0153
0,10-0,20	0,100	0,883	0,017	0,0888	0,1015	0,0183
0,20-0,30	0,080	0,852	0,068	0,0800	0,0914	0,0148
0,30-0,40	0,140	0,807	0,053	0,0910	0,1362	0,0133

FONTE: Adaptado de Cortez et al. (2011)

Antes da instalação do experimento a área foi irrigada e preparada com o sistema de preparo convencional do solo. Como fonte de potência para tracionar os implementos de preparo do solo, utilizou-se um trator da marca New Holland, modelo TT3840, 40,48 kW (55 cv) de potência nominal no motor. Os implementos utilizados para gradagem e aração do solo foram: grade leve off-set, marca Marchesan TATU, modelo: GAM, com 8 discos em cada seção (duas), sendo recortados de 0,56 m e profundidade de trabalho de 0,10 m, depois preparado com arado de aivecas recortadas da marca Maschietto, modelo ARH2, profundidade de trabalho de 0,42 m, massa de 570 kg e o nivelamento com grade leve em Tandem,

marca Marchesan TATU, modelo: GH, com 7 discos em cada seção (quatro), sendo recortados na dianteira de 0,51 m e lisos na traseira com mesmo diâmetro e distância entre discos de 0,19 m, profundidade de trabalho de 0,10 m.

4.2 Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas com quatro repetições (4 blocos). Cada parcela foi composta por três subparcelas (Figura 1). Os tratamentos constituíram-se de três veículos de tráfego nas parcelas e quatro intensidades de carga (3x4). Os veículos aplicados nas parcelas principais foram:

- Trator agrícola (Trator) da marca Massey Ferguson, modelo 250XE, 4x2, com potência nominal de 40,48 kW (55 cv) no motor, 2860 kg de massa (30% na dianteira e 70% traseira), pneus traseiros 14.9-24 R1 e dianteiros 6.00-16F2;
- Quadriciclo da marca Honda Fourtrax, modelo 420TM, com potência nominal de 7,36 kW (10 cv) no motor, com 270 kg de massa, pneus traseiros atp 10-11 e dianteiros atp 8-12;
- Mini-baja (Baja), 220 kg de massa, motor a gasolina, com potência nominal de 7,36 kW (10 cv) no motor, pneus dianteiros AT 21/7R10 e traseiros AT 22/8R10. Possui carenagem de PVC e gaiola tubular de aço SAE 1020. Este protótipo cumpre todas as regras impostas pela SAE (Sociedade de Engenharia Automotiva) para a proteção do operador em caso de tombamento ou capotagem.

Os dados dos pneus e pressões estimadas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados dos pneus, área de contato e pressão estimada aplicada pelos rodados dos veículos utilizados no experimento.

Tratores	Diâmetro dos pneus (m)		Largura dos pneus (m)		Massa (kg)	Área de contato* (m ²)		Pressão aplicada por rodado (kPa)	
	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro		Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
Trator	0,41	0,61	0,15	0,38	2860	0,057	0,151	73,75	65,40
Quadriciclo	0,30	0,28	0,20	0,25	270	0,075	0,093	10,60	5,69
Baja	0,25	0,25	0,21	0,22	220	0,078	0,082	5,53	7,86

* Área de contato estimada por meio das equações propostas por Keller (2005) e Lanças et al. (2005).

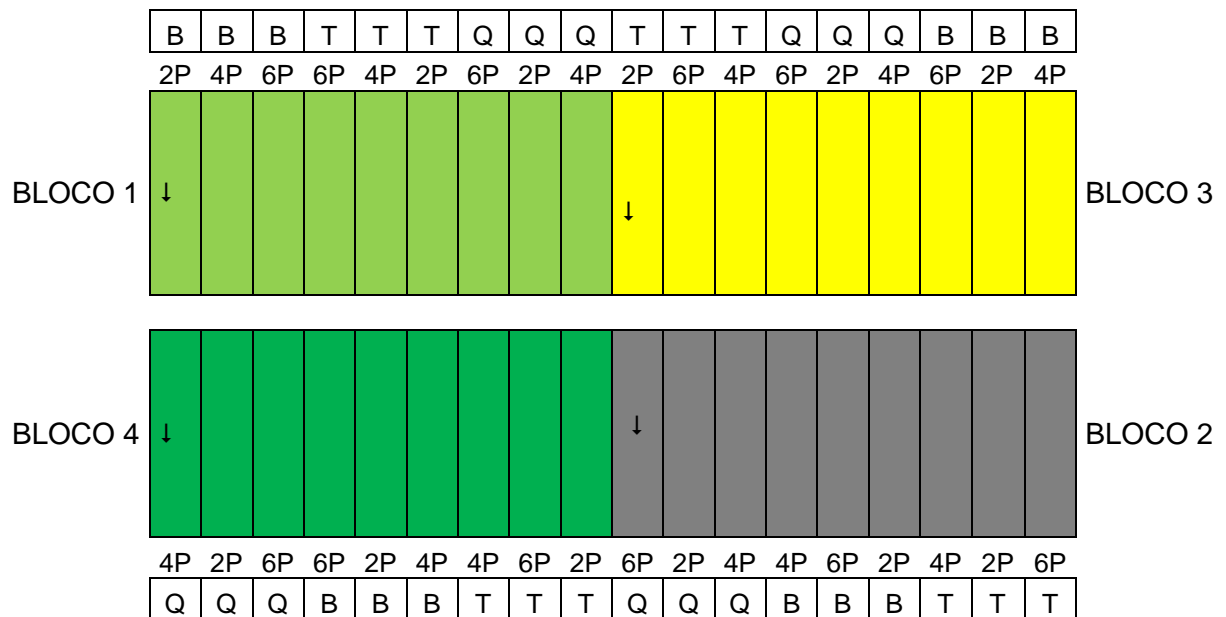


Figura 1. Croqui da área experimental com a disposição das parcelas e subparcelas.

Cada subparcela recebeu níveis de carga, sendo 0, 2, 4 e 6 passadas, a testemunha correspondente a 0 passadas e os dados foram coletados nas entrelinhas de tráfego. Cada parcela experimental ocupou área de 7,5 x 8 m (60 m²), sendo composta por subparcelas que tiveram as dimensões de 2,5 x 8 m (20 m²). Na avaliação dos efeitos causados pelos veículos sobre o solo foram utilizados como parâmetros a densidade do solo, porosidade total do solo, resistência à penetração pontual e de perfil nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m.

4.3 Atributos do solo

Para determinação da densidade do solo foram retiradas amostras indeformadas nas camadas utilizando anéis volumétricos com volume de 128 cm³. As amostras de solo foram coletadas em um ponto aleatório na linha de tráfego de cada subparcela, enquanto as testemunhas foram coletadas entre as linhas de tráfego. Foram coletadas 192 amostras, sendo 48 amostras para cada nível de carga. Após serem coletadas as amostras, foram secas em estufa à temperatura de 105 - 110° C até massa constante (EMBRAPA, 1997). Depois de secas, foram pesadas, para a obtenção dos valores necessários no cálculo da densidade do solo empregando a equação 1.

$$D_s = \frac{M}{V} \text{ em que } M = M_{II} - TA \quad (1)$$

Em que: D_s: densidade em (g cm⁻³); V: volume total (cm³); M: massa do solo (g); M_{II}: massa seca da terra mais o peso do anel (g); TA: peso do anel sem terra (g).

A porosidade total determinada (P_t) foi obtida após os anéis terem sido colocados em uma bandeja com água até atingirem o ponto de saturação e sendo pesados novamente (equação 2), a partir daí obteve à porosidade total determinada segundo Camargo et al. (1986).

$$P_t = \left(\frac{V_t - V_s}{V_t} \right) \times 100 \text{ onde } V_s = V_t - V_v \text{ e } V_v = (M_{sat} - M_{sec}) \quad (2)$$

Em que: P_t é a porosidade total (g); V_t é o volume total (g); V_s é o volume de sólidos (g); V_v é o volume de vazios (g); M_{sat} é a massa do anel saturado com água (g); e M_{sec} é a massa seca de solo com o anel (g).

Para a determinação do teor de água no solo foram coletadas amostras nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,0-0,30; 0,30-0,40 m de modo aleatório na área empregando-se o método gravimétrico. O cálculo do teor médio de água está demonstrado conforme equação 3.

$$TMA = \frac{M_I - M_{II}}{M_{II} - TA} \times 100 \quad (3)$$

Em que: TMA: teor médio de água contido no solo em %; M_I: massa úmida de solo mais o peso do anel (g); M_{II}: massa seca de terra mais o peso do anel (g); e TA: peso do anel em (g).

Macro e microporosidade estimadas foram obtidas utilizando-se a metodologia de Stolf et.al (2011). Para suas determinações foram utilizadas as equações 4 e 5.

$$\text{Macro} = 0,693 - 0,465 * D_s + 0,212 * \text{areia} \quad (4)$$

$$\text{Micro} = 0,337 + 0,120 * D_s - 0,294 * \text{areia} \quad (5)$$

Em que: Macro é a macroporosidade (m^3m^{-3}); Micro é a microporosidade (m^3m^{-3}); D_s é a densidade em (g cm^{-3}); areia corresponde à quantidade de areia (kg kg^{-1}) por quilo de solo da camada analisada.

Para a coleta de dados pontual, referente à resistência mecânica do solo a penetração foi utilizado penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar - Stolf desenvolvido por Stolf et al. (1983). Em cada subparcela, os dados foram coletados até a profundidade de 0,40 m e foram transformados para MPa conforme Stolf (1990; 1991) descreve na equação 6.

$$RP = \frac{5,8 + 6,89 * N}{10,2} \quad (6)$$

Em que: RP é a resistência à penetração [MPa]; e N é o número de impactos.

Em função da largura de trabalho de cada veículo foi avaliado o perfil da área de tráfego com o penetrômetro de impacto, sendo a coleta transversal ao deslocamento da máquina a cada 0,20 m até a profundidade de 0,40 m (Figura 2).

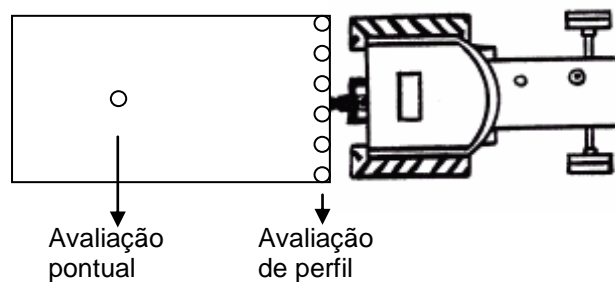


Figura 2: Esquema para coleta de dados pontual e de perfil

4.4 Análise dos dados

A análise dos dados em parcela subdividida foi realizada pela análise de variância e posteriormente com o teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação de médias.

Foi construído o semivariograma, partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca e do cálculo da função semivariância. Foi calculado o semivariograma para analisar a dependência espacial. O ajuste do semivariograma foi observado pelo maior valor do coeficiente de determinação (r^2), menor valor da soma de quadrados dos desvios (RSS) e maior valor do avaliador dependência espacial (ADE). O semivariograma fornece estimativas dos parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance. O efeito pepita (C_0) é o parâmetro do semivariograma que indica a variabilidade não explicada dos modelos, considerando a distância de amostragem utilizada. O semivariograma apresenta efeito pepita puro quando a semivariância for igual para todos os valores de h . O patamar ($C_0 + C$) é o valor da semivariância onde a curva se estabiliza sobre um valor constante, sendo representado pelo ponto em que toda a semivariância da amostra é de influência aleatória. À medida que h aumenta a semivariância também aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza. O alcance da dependência espacial representa a distância na qual os pontos amostrais estão correlacionados entre si. A análise da dependência espacial (ADE) foi realizada segundo Landim (1998). Em seguida à modelagem dos semivariogramas, foi realizada a interpolação por “krigagem” ordinária para a estimativa de valores em locais não amostrados para geração dos mapas de isolinhas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Densidade do solo

Por meio da tabela 2 consta-se que as maiores pressões estimadas aplicadas pelos rodados dos veículos sobre o solo são de 73,75, 10,6 e 7,86 kPa para trator, quadriciclo e baja respectivamente. Comparando os valores de densidade da testemunha (zero passadas) com os obtidos nas linhas de tráfego (Tabela 3), percebe-se que o trator agrícola foi o que apresentou os maiores valores em todas as camadas, resultado devido a maior pressão aplicada pelos rodados do trator, chegando até a profundidade de 0,40 m.

Tabela 3. Densidade (Ds) para cada camada de solo em função dos veículos (V) e das cargas (C).

Veículos	Camadas(m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
Densidade do solo (Mg m⁻³)				
Baja	1,57 b	1,63 b	1,66 b	1,69 b
Quadriciclo	1,60 b	1,62 b	1,66 b	1,68 b
Trator	1,70 a	1,73 a	1,75 a	1,77 a
Carga				
0 passadas	1,49 c	1,55 c	1,58 c	1,62 c
2 passadas	1,64 b	1,66 b	1,70 b	1,72 b
4 passadas	1,66 a	1,70 a	1,72 ab	1,74 ab
6 passadas	1,70 a	1,73 a	1,75 a	1,76 a
Teste F				
V	61,98 **	84,65 **	44,19 **	57,54 **
C	98,64 **	97,63 **	56,10 **	88,52 **
V x C	6,22 **	3,64 **	5,01**	12,75 **
CV(V)	2,11	1,50	1,90	1,58
CV(C)	2,02	1,66	1,98	1,32

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey. ns: não significativo ($P > 0,05$); *: significativo ($P \leq 0,05$); **: significativo ($P \leq 0,01$); CV: coeficiente de variação (%).

Beutler et al. (2006) constataram que a compactação proveniente do tráfego de máquinas em um Latossolo Vermelho de textura média atingiu apenas a profundidade de 0,18 m, no entanto, segundo Beutler et al. (2009), isso aconteceu devido ao Latossolo ter em sua constituição, uma maior quantidade de argila, tornando a matriz do solo mais resistente a pressões.

Para as camadas de 0,00-0,20 m constata-se que a intensidade de carga de quatro passadas provocou um aumento expressivo na densidade do solo, e nas

camadas de 0,20-0,40 m, somente com seis passadas ocorreu diferenças dos menores níveis de carga. Estes resultados apresentam comportamentos similares aos encontrados por Freddi et al. (2007) e Valicheski et al. (2012) que submeteram um Latossolo Vermelho distrófico típico e um franco siltoso respectivamente a diferentes intensidades de tráfego. Segundo Valicheski et al. (2012) o aumento expressivo da densidade do solo logo após as duas primeiras passadas ocorre possivelmente devido à quebra dos agregados, propiciando a aproximação das partículas.

Houve variação de 1,57 a 1,77 Mg m⁻³ nas medias de densidade, sendo os maiores valores observados na camada de 0,30-0,40 m para os tratamentos, isso se deve provavelmente a maior concentração de argila e silte desta camada. As densidades ocasionadas pelo tráfego do baja e quadriciclo foram estatisticamente iguais em todas as camadas, e seus valores variaram entre 1,57 a 1,69 Mg m⁻³, diferenciando-se dos promovidos pelo tráfego do trator, que variaram entre 1,70 e 1,77 Mg m⁻³.

Reichert et al. (2003) indicaram que a densidade crítica para solos franco-arenosos varia de 1,70 a 1,80 Mg m⁻³, comparando estes dados com os obtidos neste experimento percebe-se que o trator ocasionou densidades dentro dessa faixa em todas as camadas, podendo limitar o desenvolvimento radicular de culturas, enquanto os demais veículos provocaram valores abaixo.

Deve-se salientar que os rodados do trator são apropriados para a função de tráfego em meio agrícola, o que não ocorre com os outros veículos, a tendência é que o aumento de densidade ocasionado tanto pelo baja quanto pelo quadriciclo tivessem menor magnitude caso os seus rodados fossem próprios para o uso na agricultura. Houve interação significativa entre veículos (V) e níveis de carga (C), sendo necessária a obtenção dos desdobramentos para melhor interpretação (Tabela 4).

Tabela 4. Interação entre veículos (V) e cargas (C) para densidade do solo.

Veículos	Camadas(m)	Cargas (passadas)			
		0	2	4	6
		Densidade do solo (Mg m⁻³)			
Baja	0,00-0,10	1,48 aB	1,58 bA	1,60 bA	1,62 bA
Quadriciclo		1,49 aC	1,59 bB	1,66 bA	1,66 bA
Trator		1,51 aC	1,73 aB	1,74 aB	1,83 aA
Baja	0,10-0,20	1,55 abC	1,61bB	1,66 bAB	1,68 bA
Quadriciclo		1,53 bB	1,63 bA	1,67 bA	1,68 bA
Trator		1,58 aC	1,73 aB	1,78 aAB	1,82 aA
Baja	0,20-0,30	1,59 aC	1,64 bBC	1,68 bAB	1,71 bA
Quadriciclo		1,57 aB	1,68 bA	1,68 bA	1,69 bA
Trator		1,59 aC	1,77 aB	1,80 aAB	1,84 aA
Baja	0,30-0,40	1,66 aB	1,69 bAB	1,70 bA	1,72 bA
Quadriciclo		1,59 bB	1,70 bA	1,70 bA	1,71 bA
Trator		1,63 abC	1,77 aB	1,81 aB	1,87 aA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os níveis de carga aplicados pelo tráfego dos veículos ocasionaram aumento na densidade do solo (Tabela 4). Rosa (2007) e Lima (2004) corroboram estes resultados, pois constataram em seus experimentos que o tráfego de máquinas promoveu a compactação do solo.

Com relação ao baja, na camada de 0,00-0,10 m observa-se que os níveis de carga ocasionaram valores estatisticamente semelhantes e abaixo do limite crítico, no entanto, nas demais camadas, houve diferença entre os níveis de 2 e 6 passadas. Já o quadriciclo proporcionou um comportamento diferente, tendo em vista que na camada de 0,00-0,10 m ocorreu diferença significativa entre 2 e 6 passadas, enquanto nas outras camadas, esses índices de cargas ocasionaram densidades semelhantes.

Constata-se que apenas o trator proporcionou em todas as interações, níveis críticos de densidade, variando de 1,73 a 1,87 Mg m⁻³ (Tabela 4), enquanto baja e quadriciclo ocasionaram apenas nas camadas de 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m, o que é compreensível devido ao maior grau de argila e silte presentes na composição destas. Verifica-se que na interação entre veículos (V) e cargas (C), baja e quadriciclo com suas correspondentes cargas apresentaram valores estatisticamente iguais, devido provavelmente à proximidade entre as massas de ambos. O trator ocasionou maiores valores de densidade o que já era esperado tendo em vista que este possui uma massa de 2860 kg, o que corresponde, por exemplo, a 15 vezes a massa do baja. Como visto baja e quadriciclo apresentaram

um menor potencial de intensidade de cargas sobre o solo, o que se traduz em menores níveis de compactação. Na camada de 0,30-0,40 m, o nível de carga de 6 passadas implementado pelo tráfego do trator, proporcionou uma densidade variável entre 1,83 a 1,87 Mg m⁻³, índice que tende a minimizar o crescimento e desenvolvimento de sistemas radiculares. Beutler et al.(2009), submetem um Argissolo vermelho-amarelo arênico ao tráfego de dois tratores, de 3 e 8 Mg respectivamente, e constaram que a produtividade do milho foi reduzida em cerca de 22% devido a compactação do solo.

5.2 Porosidade total do solo

As áreas que não receberam cargas pelo tráfego dos veículos apresentaram os maiores valores, variando de 0,42 a 0,46 m³ m⁻³, e são semelhantes aos encontrados por Cortez et al. (2011), que obtiveram em Argissolo Amarelo Distrófico típico valores de Pt variando entre 0,42 e 0,45 m³ m⁻³ na camada de 0,00-0,30 m com preparo, enquanto Silva et al.(2002) constataram em Argissolo Amarelo Eutrófico a oscilação de 0,37 a 0,44 m³ m⁻³ na camada de 0,00-0,60 m. O incremento na porosidade foi expressivo logo após as 2 primeiras passadas dos veículos (Tabela 5), sendo mais acentuado que os demais níveis de carga, comportamento semelhante aos resultados obtidos por Valicheski et al.(2012).

Baja e quadriciclo foram estatisticamente iguais se diferenciando do trator que apresentou os menores valores de porosidade total do solo para as camadas (Tabela 5), promovendo maior impacto sobre o solo. A porosidade total do solo diminuiu com a profundidade, seus valores oscilaram entre 0,38 e 0,26 m³m⁻³ devido provavelmente ao aumento gradual do teor de argila e silte aliado à incidência de cargas a que o solo foi submetido.

Tabela 5. Porosidade total para cada camada de solo, em função dos veículos (V) e das cargas (C)

Veículos	Camada(m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
Porosidade total do solo (m³m⁻³)				
Baja	0,38 a	0,37 a	0,33 a	0,32 a
Quadriciclo	0,35 a	0,33 a	0,34 a	0,36 a
Trator	0,29 b	0,28 b	0,28 b	0,26 b
Carga				
0 passadas	0,46 a	0,42 a	0,45 a	0,42 a
2 passadas	0,32 b	0,35 b	0,30 b	0,33 b
4 passadas	0,30 b	0,28 c	0,27 b	0,30 c
6 passadas	0,30 b	0,25 c	0,26 b	0,25 d
Teste F				
V	7,19 *	9,30 **	7,70 *	10,76 **
C	39,60 **	45,00 **	57,81 **	73,94 **
V x C	4,47 **	3,43 **	4,18 **	8,01 **
CV(V)	20,47	17,20	16,19	19,48
CV(C)	13,19	11,45	12,74	9,12

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo ($P > 0,05$); *: significativo ($P \leq 0,05$); **: significativo ($P \leq 0,01$); CV: coeficiente de variação (%)

Houve interação significativa entre os veículos e cargas em todas as camadas sendo necessária a obtenção dos desdobramentos para melhor discussão dos dados (Tabela 6). Na camada de 0,00-0,10 m, as porosidades obtidas nas linhas trafegadas por baja e quadriciclo, foram similares para os níveis de 2 e 6 passadas, diferenciando-se dos níveis ocasionados pelas pressões submetidas ao solo pelo tráfego do trator, no entanto, nas linhas submetidas a 4 passadas, foram observados valores similares para os três tratamentos, o que também ocorre na camada de 0,20-0,30 m, já na camada de 0,10-0,20 m, há uma similaridade entre trator e quadriciclo para os níveis de 2 e 4 passadas. Na camada de 0,30-0,40 m, as amostras retiradas nas linhas trafegadas pelo quadriciclo com a carga de 4 passadas apresentaram uma porosidade de 0,33 m³ m⁻³, valor similar ao do baja e diferente do trator.

Tabela 6. Desdobramentos da interação entre veículos (V) e cargas (C) para porosidade total do solo.

Veículos	Camadas(m)	Cargas (passadas)			
		0	2	4	6
Porosidade total do solo (m³m⁻³)					
Baja	0,00-0,10	0,47 aA	0,38 aB	0,34 aB	0,34 aB
Quadriciclo		0,43 aA	0,33 aB	0,29 aB	0,34 aB
Trator		0,48 aA	0,24 bB	0,25 aB	0,19 bB
Baja	0,10-0,20	0,43 aA	0,39 aAB	0,33 aBC	0,31 aC
Quadriciclo		0,40 aA	0,35 abAB	0,29 abBC	0,28 aC
Trator		0,42 aA	0,30 bB	0,24 bB	0,16 bC
Baja	0,20-0,30	0,42 aA	0,32 aB	0,29 aB	0,31 aB
Quadriciclo		0,47 aA	0,31 abB	0,28 aB	0,30 aB
Trator		0,46 aA	0,25 bB	0,22 aB	0,17 bB
Baja	0,30-0,40	0,39 aA	0,35 aAB	0,30 abBC	0,28 aC
Quadriciclo		0,44 aA	0,38 aA	0,33 aB	0,31 aB
Trator		0,42 aA	0,24 bB	0,24 bB	0,15 bC

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observando os valores de densidade e porosidade total, constata-se que as alterações mais significativas ocorrem na camada mais superficial e logo depois das primeiras passadas dos veículos, o que é corroborado por Valicheski et al. (2012), que afirmam que deve-se evitar o tráfego de máquinas caso o solo esteja sob níveis de umidade inapropriados.

5.3 Macroporosidade

Segundo Tavares Filho et al. (1999), a estrutura do solo é alterada em função da compactação, e os macroagregados são os primeiros a serem destruídos. Constata-se que a incidência de cargas sobre o solo minimizou a macroporosidade e que houve uma sensível redução ao longo do perfil analisado (Tabela 7). A testemunha apresentou valores acima do mínimo ideal para o desenvolvimento de plantas, que segundo Suzuki (2012) é de 0,10 m³ m⁻³, no entanto, com o aumento do nível de carga, observam-se valores variando de 0,12 a 0,04 m³ m⁻³.

Os valores de macroporosidade ocasionados pelo tráfego dos veículos oscilaram entre 0,15 e 0,04 m³ m⁻³, sendo que baja e quadriciclo apresentaram

valores entre 0,15 e 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,00-0,30 m, porém, esses índices foram de 0,08 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,30-0,40 m, já as amostras retiradas nas linhas trafegadas pelo trator apresentaram valores abaixo do mínimo em todas as camadas, denotando seu maior grau de compactação e conseqüente impacto sobre o solo. Solos dotados de macroporosidade reduzida induzem o crescimento lateral das raízes, uma vez que estas diminuem seu diâmetro com o objetivo de penetrar os poros menores (BEUTLER et al., 2003).

Tabela 7. Macroporosidade do solo em função do tráfego de veículos (V) e das cargas aplicadas (C).

Veículos	Camadas(m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
Macroporosidade (m^3m^{-3})				
Baja	0,15 a	0,12 a	0,10 a	0,08 a
Quadriciclo	0,13 b	0,12 a	0,10 a	0,08 a
Trator	0,09 c	0,08 b	0,06 b	0,04 b
Carga				
0 passadas	0,19 a	0,16 a	0,14 a	0,11 a
2 passadas	0,12 b	0,11 b	0,08 b	0,06 b
4 passadas	0,10 c	0,09 c	0,07 b	0,05 b
6 passadas	0,09 c	0,07 c	0,06 c	0,04 c
Teste F				
V	102,19 **	96,69 **	34,11**	73,07 **
C	96,43 **	95,75 **	50,40 **	87,18 **
V x C	5,33 **	3,88 **	3,92 **	10,37 **
CV(V)	10,35	10,15	18,90	14,63
CV(C)	12,60	12,04	18,33	14,90

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo ($P>0,05$); *: significativo ($P\leq 0,05$); **: significativo ($P\leq 0,01$); CV: coeficiente de variação (%)

O tráfego de veículos em conjunto com a submissão do solo a cargas propiciou a redução da macroporosidade. Analisando exclusivamente a interação entre veículo e carga, nota-se que o baja apresentou semelhança entre o nível de 0 e 2 passadas na camada de 0,20-0,30 m nas outras interações e para ambos os veículos, houve diferença significativa entre a testemunha e os demais níveis de carga (Tabela 8). Percebe-se que a interação entre cargas e trator ocasionou valores abaixo do mínimo ideal em todas as situações apresentadas, no entanto, os demais veículos promoveram macroporosidades abaixo do ideal a partir da camada 0,20-0,30 m, onde as amostras retiradas nas linhas submetidas a 2 passadas do quadriciclo apresentaram porosidade de 0,09 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Tabela 8. Desdobramentos da interação entre tráfego de veículos (V) e cargas aplicadas (C) para macroporosidade.

Veículos	Camadas(m)	Cargas (passadas)			
		0	2	4	6
Macroporosidade (m³m⁻³)					
Baja	0,00-0,10	0,20 aA	0,14 aB	0,13 aB	0,12 aB
Quadriciclo		0,19 aA	0,14 aB	0,11 aC	0,10 aC
Trator		0,18 aA	0,07 bB	0,07 bB	0,03 bC
Baja	0,10-0,20	0,16 abA	0,13 aB	0,11 aBC	0,10 aC
Quadriciclo		0,17 aA	0,12 aB	0,10 aB	0,10 aC
Trator		0,14 bA	0,08 bB	0,05 bC	0,03 bC
Baja	0,20-0,30	0,13 aA	0,11 aAB	0,09 aBC	0,07 aC
Quadriciclo		0,14 aA	0,09 aB	0,09 aB	0,09 aB
Trator		0,13 aA	0,05 bB	0,04 bBC	0,02 bC
Baja	0,30-0,40	0,09 bA	0,08 aAB	0,07 aB	0,06 aB
Quadriciclo		0,12 aA	0,07 aB	0,07 aB	0,07 aB
Trator		0,11 aA	0,04 bB	0,02 bC	0,01 bC

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.4 Microporosidade

Tendo em vista que macro e microporosidade variam inversamente, era plausível subentender que a incidência de cargas reduzisse a macroporosidade ao mesmo tempo em que ocasionasse um acréscimo nos valores de microporosidade, esta aumentou com a profundidade do solo o que era de se esperar, tendo em vista que as densidades apresentaram este mesmo comportamento. Constata-se que as áreas não trafegadas apresentaram menores valores de microporosidade (Tabela 9) e estatisticamente diferentes das linhas trafegadas e submetidas a três diferentes níveis de carga. O trator foi significativamente diferente dos demais ocasionando maiores valores de microporosidade em todas as camadas, mostrando que o mesmo submete o solo, maiores mudanças sobre os seus atributos físicos, enfatizando os resultados obtidos sobre a macroporosidade, atributo que se constitui como um forte indicio de compactação.

Tabela 9. Microporosidade do solo em função do tráfego de veículos (V) e das cargas aplicadas (C).

Veículos	Camadas(m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
Microporosidade (m³m⁻³)				
Baja	0,27 b	0,27 b	0,28 b	0,30 b
Quadriciclo	0,27 b	0,27 b	0,28 b	0,30 b
Trator	0,28 a	0,28 a	0,30 a	0,31 a
Carga				
0 passadas	0,26 c	0,26 c	0,27 c	0,29 c
2 passadas	0,27 b	0,27 b	0,29 b	0,30 b
4 passadas	0,28 a	0,28 a	0,29 b	0,30 b
6 passadas	0,28 a	0,28 a	0,30 a	0,31 a
Teste F				
Ta	39,00 **	103,90 **	29,37 **	29,44 **
Tb	65,89 **	67,96 **	59,63 **	31,94 **
V x C	6,22 **	2,18 ns	5,38 **	8,71 **
CV(V)	1,83	1,00	1,89	1,69
CV(C)	1,83	1,56	1,42	1,36

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo ($P>0,05$); *: significativo ($P\leq 0,05$); **: significativo ($P\leq 0,01$); CV: coeficiente de variação (%)

O tráfego de veículos associados à implementação de cargas sobre o solo ocasionou mudanças na microporosidade em todas as camadas analisadas (Tabela 10). As interações entre baja e as cargas apresentaram valores semelhantes nas 3 camadas, comportamento também apresentado pelo quadriciclo exceto na camada de 0,00-0,10 m para a incidência de 2 passadas que diferiu das cargas de 4 e 6 passadas, já a interação trator e cargas, apresentou comportamento diferente, mesmo porque, a interação com a intensidade de 6 passadas foi diferente das demais cargas nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,20-0,30 m, no entanto, na camada de 0,30-0,40 m as interações com 4 e 6 passadas foram semelhantes.

Tabela 10. Desdobramentos da interação entre tráfego de veículos (V) e cargas aplicadas (C) para microporosidade

Veículos	Camadas(m)	Cargas (passadas)			
		0	2	4	6
Microporosidade (m³m⁻³)					
Baja	0,00-0,10	0,26 aB	0,27 bA	0,27 bA	0,27 bA
Quadriciclo		0,26 aC	0,27 bB	0,28 bA	0,28 bA
Trator		0,26 aC	0,29 aB	0,31 aB	0,32 aA
Baja	0,20-0,30	0,27 aB	0,28 bAB	0,29 bA	0,29 bA
Quadriciclo		0,27 aB	0,28 bA	0,29 bA	0,29 bA
Trator		0,27 aB	0,30 aB	0,30 aB	0,31 aA
Baja	0,30-0,40	0,30 aA	0,30 bA	0,30 bA	0,31 bA
Quadriciclo		0,29 bB	0,30 bA	0,30 bA	0,30 bA
Trator		0,30 aC	0,31 aB	0,32 aA	0,34 aA

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, e maiúscula na linha não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.5 Resistência mecânica do solo à penetração (RP)

Para RP os resultados foram significativos no teste de Tukey na camada de 0,00-0,10 e 0,30-0,40 m, tendo o trator com o maior valor de RP encontrado. Enquanto que o aumento das cargas promoveu variação significativa pelo teste de Tukey na camada de 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, com os maiores valores com 2 e 4 passadas (Tabela 11).

Tabela 11. Resistência à penetração do solo (RP) em função do tráfego de veículos (V) e das cargas aplicadas (C).

Veículos	Camadas (m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
Resistência à penetração (MPa)				
Baja	0,57 b	0,85 a	1,46 a	1,97 b
Quadriciclo	0,68 b	0,90 a	1,24 a	2,10 b
Trator	0,90 a	1,07 a	1,75 a	2,71 a
Carga				
0 passadas	0,62 a	0,96 a	1,35 b	1,98 b
2 passadas	0,73 a	0,96 a	1,46 a	2,25 ab
4 passadas	0,79 a	0,91 a	1,63 a	2,54 a
6 passadas	0,62 a	0,96 a	1,35 b	1,98 b
Teste F				
Ta	3,50 ns	1,50 ns	3,60 ns	24,26 **
Tb	2,33 ns	0,09 ns	2,71 ns	8,34 **
V x C	2,33 ns	0,51 ns	2,73 ns	0,65 ns
CV(V)	43,93	34,89	31,30	12,29
CV(C)	26,90	38,71	20,12	14,98

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo ($P > 0,05$); *: significativo ($P \leq 0,05$); **: significativo ($P \leq 0,01$); CV: coeficiente de variação (%)

5.5.1 Análise de resistência à penetração no perfil do solo

Os modelos esférico e exponencial foram os que demonstraram melhor ajuste para cargas e veículos (Tabela 12), o coeficiente de determinação (R^2) variou de 0,90 a 0,98, o que confere uma maior confiabilidade aos modelos. Faraco (2006) afirma que o uso do semivariograma permite estudar a dispersão das variáveis regionalizadas, senso utilizado para explicar como essas variáveis se comportam numa dada direção. Desta forma, sua utilização é considerável devido à representação da dependência espacial que explica a associação espacial dos pontos amostrais para as distancias entre eles.

Segundo Vieira (2000), quando ocorrer uma menor variação ao acaso há uma maior exatidão nas estimativas, situação que predomina nos valores do efeito pepita (Co), quando estes apresentaram uma variação de 0,0001 a 0,003, tornando mais exata a krigagem dos dados. Segundo Zimback (2001) o grau de dependência espacial (ADE) é classificado como forte a partir de 0,75, e observando os valores nota-se que estes variaram de 0,99 a 1,00.

Tabela 12. Dados do semivariograma para a resistência mecânica do solo à penetração (RP) em função das cargas (passadas) e veículos.

Cargas	Modelo	Co	Co+C	a(m)	R²	SQR	ADE	Classe
Baja								
2	Esférico	0,0001	0,230	0,397	0,98	0,0004	1,00	Forte
4	Esférico	0,001	0,421	0,370	0,96	0,0034	0,99	Forte
6	Esférico	0,001	0,550	0,435	0,94	0,0029	0,99	Forte
Quadríciclo								
2	Exponencial	0,003	0,891	0,262	0,92	0,0097	0,99	Forte
4	Esférico	0,001	1,161	0,478	0,94	0,0173	0,99	Forte
6	Esférico	0,001	1,770	0,431	0,97	0,0160	0,99	Forte
Trator								
2	Exponencial	0,001	0,722	0,200	0,90	0,0089	0,99	Forte
4	Esférico	0,001	0,599	0,386	0,92	0,0048	0,99	Forte
6	Esférico	0,001	0,935	0,366	0,93	0,0099	0,99	Forte

Co = efeito pepita; Co + C = patamar; a = alcance; R² = coeficiente de determinação; SQR=soma dos quadrados dos desvios; ADE = avaliador da dependência espacial

O quadríciclo foi o tratamento que apresentou o maior valor de efeito pepita (Co), 0,003 para a carga de 2 passadas, enquanto o trator apresentou uma constância nos valores, 0,001, já o baja foi o tratamento que apresentou o menor

valor de efeito pepita, sendo de 0,0001 para a intensidade de 2 passadas (Tabela 12). Para os alcances, observa-se uma variação de 0,20 a 0,48 m, permitindo afirmar que para a obtenção da mesma precisão dos dados, as malhas estudadas poderiam ter sido de no mínimo 0,20 m e no máximo 0,48 m entre os pontos horizontais na seção transversal a passagem das máquinas.

Nas Figuras 3, 4 e 5 estão apresentados os mapas de isolinhas para representação da RP de perfil ocasionada pelo tráfego dos veículos. Os valores de RP são em MPa e estão agrupados em 5 classes de cores de ordem crescente. Ao interpretar os mapas, pode-se constatar qual o tratamento proporcionou maiores valores de RP.

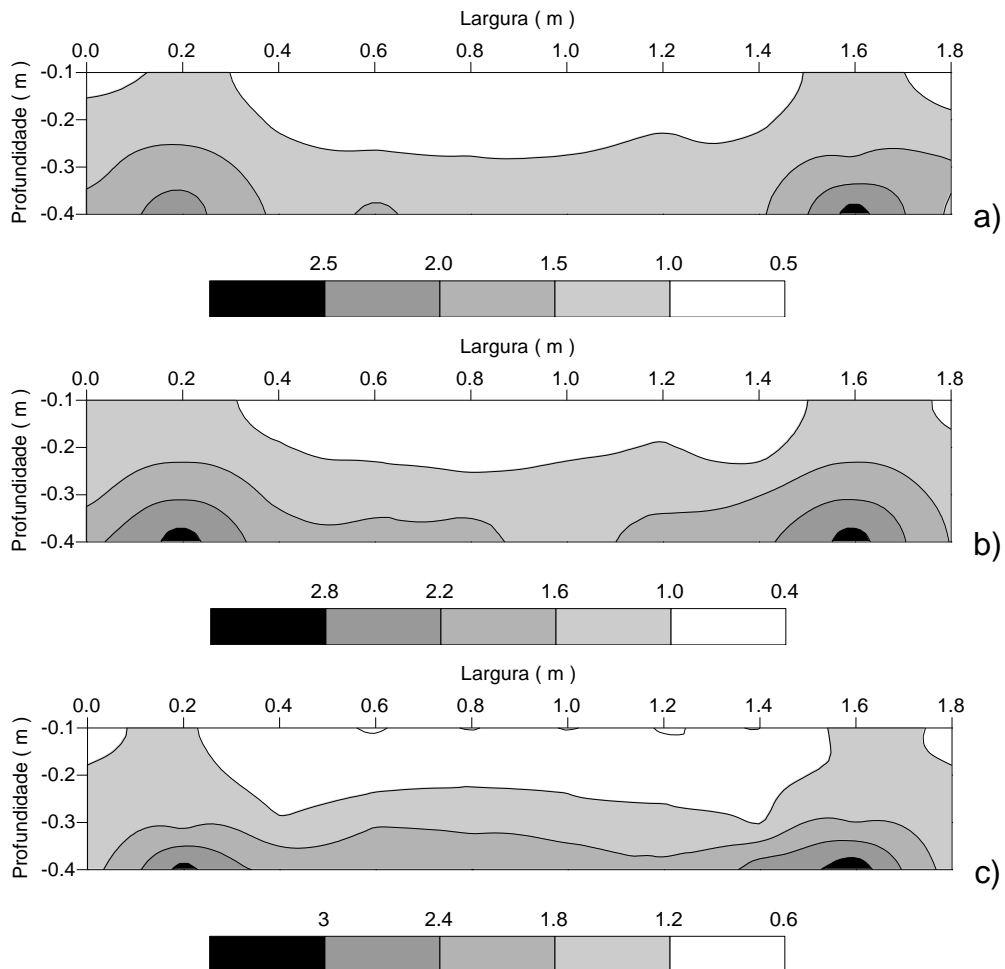


Figura 3. Mapas de isolinhas do Baja para RP de perfil (MPa) em função das cargas: a) 2 passadas, b) 4 passadas e c) 6 passadas

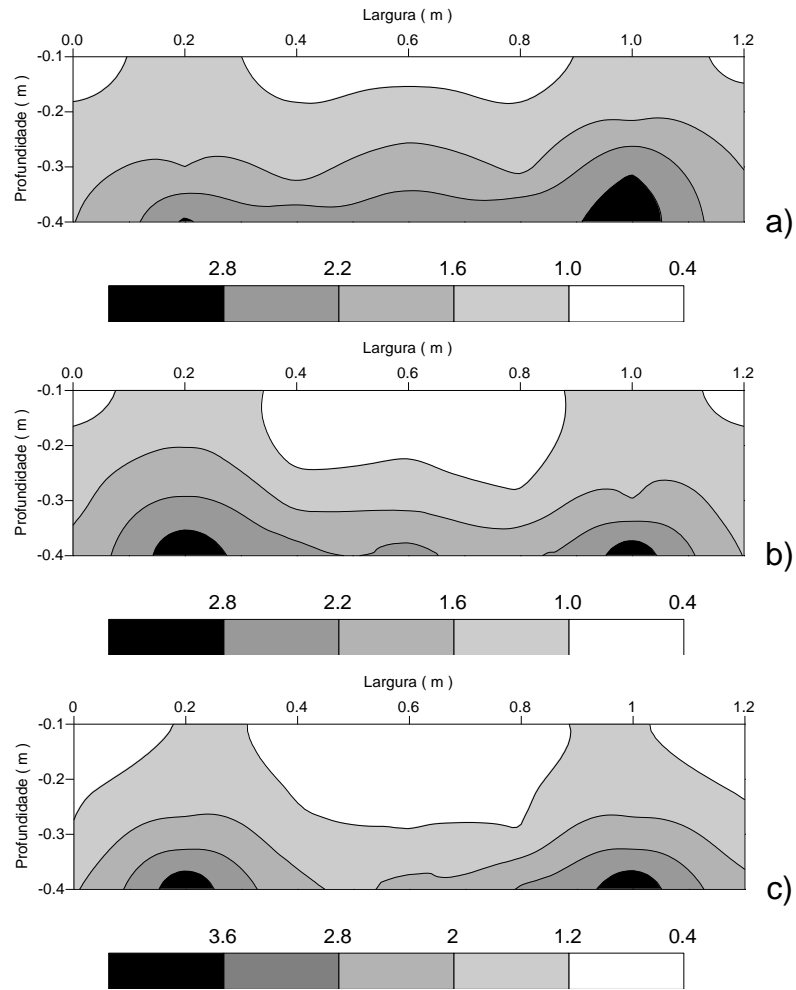


Figura 4. Mapas de isolinhas do Quadríciclo para RP de perfil (MPa) em função das cargas: a) 2 passadas, b) 4 passadas e c) 6 passadas

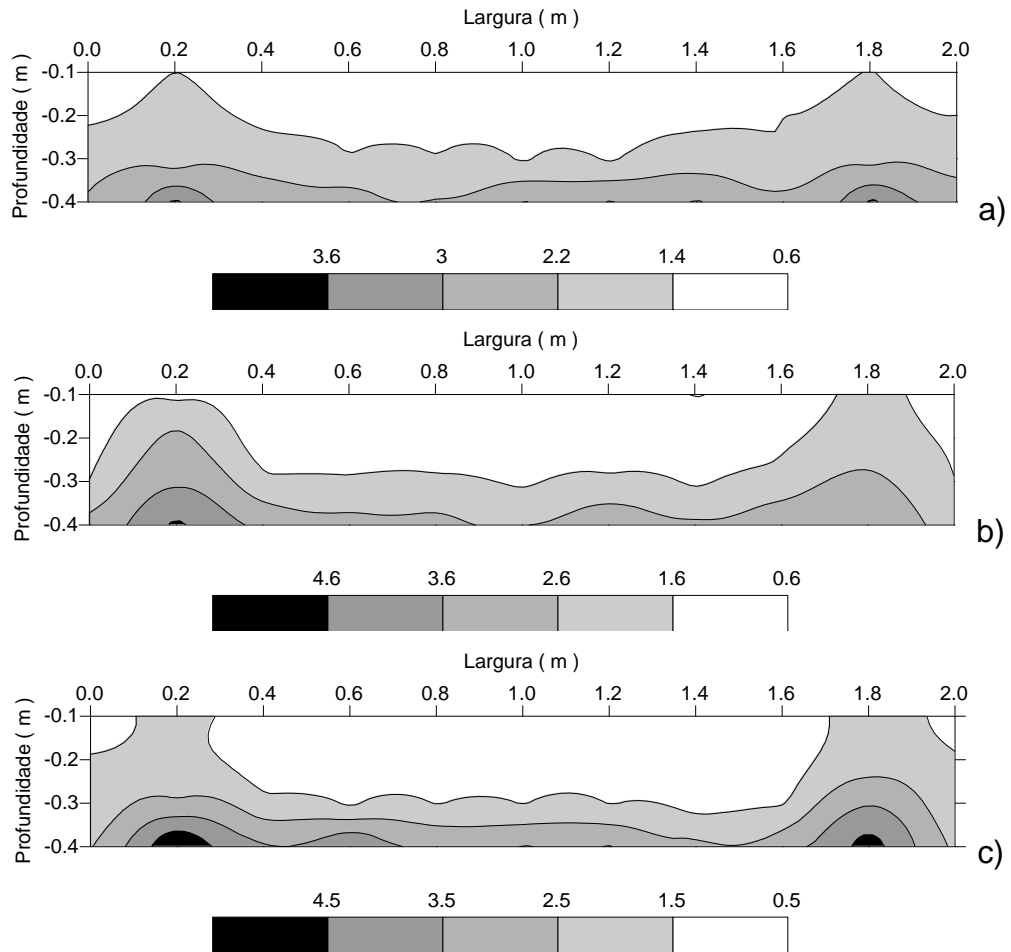


Figura 5. Mapas de isolinhas do Trator para RP de perfil (MPa) em função das cargas: a) 2 passadas, b) 4 passadas e c) 6 passadas.

Percebe-se que a RP é pronunciada nas linhas de tráfego desde a camada de 0,00-0,10 m, sendo crescente com o aumento da carga e profundidade do solo, o que é aceitável devido ao aumento gradual no teor de argila e pela matriz do solo facilitar a propagação das tensões no perfil (Figuras 3, 4 e 5). A intensidade de 6 passadas provocou o maiores níveis de RP para ambos os veículos, sendo de 3,0; 3,6 e 4,5 MPa para baja, quadriciclo e trator respectivamente, valores que estão abaixo do limite crítico de 6 MPa para solos arenosos.

6 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos e nas condições em que foi desenvolvido este trabalho, conclui-se que:

As menores mudanças nos atributos do solo foram verificadas pelo uso dos veículos baja e quadriciclo. O trator agrícola apresentou as maiores mudanças nos atributos do solo apresentando valores críticos nos atributos densidade, porosidade, macroporosidade e microporosidade.

O nível de carga com quatro passadas nas camadas superfícies (0,00-0,20 m) e seis passadas nas camadas mais profundas (0,20-0,40 m) provocou maiores alterações sobre os atributos do solo.

Os valores de resistência à penetração do perfil do solo ficaram abaixo do limite crítico para os tratamentos.

7 REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p. 519-531, 2004.

ALAKUKKU, L. & ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil Tillage. Research.**, v.36,p.141-152, 1995.

AMARAL, F. C. S.; SILVA, E. F.; MELO, A. S. **Caracterização pedológica e estudos de infiltração da água no solo em perímetros irrigados no Vale do São Francisco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 104p.

ARAÚJO, W. F.; SOUSA, K. T. S. de; VIANA, T. V. de A.; AZEVEDO, B.M. de; BARROS, M. M.; MARCOLINO E. Resposta da alface a adubação nitrogenada. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 5, n. 1, p. 12-17, 2011.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.3, p.425-535, 2005.

ASSIS, R. L. de & LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um nitossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005.

ALTIERI, M.; LANA, M. A.; BITTENCOURT, H. V. H.; VENTURI, M.; KIELING, A. DOS S.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E. Aumento do rendimento dos cultivos através da supressão de plantas espontâneas em sistemas de plantio direto orgânico em Santa Catarina, Brasil. **Agroecologia**, v.7,n.1, p.63-71, 2012.

BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; DOUGLAS, J.T.; HENSHALL, J.K. & O'SULLIVAN, M.F. Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal of Soil Science**, v.48, p-593-601, 1997.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J. F.; MENGATTO, L. H.; MENGATTO, L. H.; ALVES, J. B.; WAGNER, G.P. C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n. 2, p.359-364, 2009.

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.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.F.; FREDDI, O. da S.; ANDRIOLI, I. Efeito da compactação do solo na estabilidade de agregados e no conteúdo gravimétrico de água. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n.2, p.193-198, 2005.

BEULTER, A. N.; CENTURION J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F. CORRÊA, G. F.; COSTA, L. M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um latossolo com compactação simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.2, p.125-130, 1997.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Sistemas de preparo de solo de cerrado: efeito nas propriedades físicas e na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.27, n.2, p.315-324, 1992.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

COLLARES, G.L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. S.; MOURA, M.R. D. ; OLSZEVSZK, 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.

CUNHA, J.P. A. R. da; CASCÃO, V.N.; REIS, E.F. dos. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.1, n.3, p.371-375, 2009.

DIAS, D. M.; ALCÂNTARA, G. R. de; REIS, E. F. dos. Relação entre o limite de plasticidade e a umidade ótima de compactação de um latossolo vermelho-escuro em diferentes condições de uso. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.20, n.1, p.25-32, 2012.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.2, p.175-182, 1996.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro: 1997. 212p.

FARACO, M. A. **Qualidade do ajuste de modelos geoestatísticos utilizados na agricultura de precisão**. 2006. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

FENNER, P.T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999.135f. (Tese de Livre Docência) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 1999.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.487-493, 2000.

FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollicochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 48, p.21-35, 1998.

FOLONI, J.S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953,2003.

FREDDI, O. da S. ; CENTURION J. F.; EUTLERA. N. B; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.627-636, 2007.

GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v.6, n., p. 65-100, 1987.

GENRO JUNIOR, S.A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. **Soil and Tillage Research**, v.46, p.209-223, 1998.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 34, n. 4, p. 535-546, 1988.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego, Academic Press, 1998. 771p.

KELLER, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. **Bios. Eng.**, v.92, p.85-96. 2005.

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**. 1996. 153p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1996.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998. 226p. (Ciência e tecnologia).

LANÇAS, K. P. SILVA, R. B. da; GUERRA, S. P. S.; PEREIRA, F. J. de S.; ACOSTA, J. J. B.; JESUÍNO, P. R.; LANÇAS, K. J. G.; PAULA, C. A. de; CAMARGO, B. F.; CAVALHEIRO, B. A. Pneus radiais. **Cultivar Máquinas**, v48, p.3–10, 2005.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LOWERY, B. & SCHULER, T.T. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. **Soil and Tillage Research**, v.29,p.205-210, 1994.

MATERECHERA, S. A.; ALSTON, A. M.; KIRBY, J. M.; DEXTER, A. R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 144, n.2, p. 297-303, 1992.

MARQUES, J. D. de O. **Horizontes pedogenéticos e sua relação com camadas hidráulicas do solo**. 2000. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

MEROTTO JR, A., MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.197-202, 1999.

MODOLO, A. J.; FERNANDES, H. C.; SCHAEFER, G. C. E.; SILVEIRA, J. C. M. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema semeadura direta. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1259-1265, 2008.

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n. 9, p.914–920, 2010.

OTHMER, H.; DIEKKRUGER, B.; KUTILEK, M. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science**, Baltimore, v. 152, n. 3, p.139-150, 1991.

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

PABIN, J., LIPIEC, J., LODEK, S., et al. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.46, n.2, p.203-208, 1998.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRTA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 521-529, 2001.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.929-938, 2000.

QUEIROGA, V.P.; SILVA, O.R.R.F. **Tecnologias utilizadas no cultivo do gergelim mecanizado**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008. 142p. (Embrapa Algodão. Documentos, 203).

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

REICHERT, J.M.; SUZUKI L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, v.5, p.49-134, 2007.

REINERT, D. J.; COLLARES, G. L.; REICHERT, J. M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n.1, p.304-316, 2007.

REIS, G. N.; BIZZI, A. C.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P.; LOPES, A.; GROTTA, D. C. C. G. Avaliação do desenvolvimento da cultura da soja (*Glycine Max (L.) Merrill*) sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.1, p.228-235, 2007.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, v.52, p.49-58, 2001.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, vol.26, p.321-344, 2005.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RUSSEL, R. S.; GOSS, M. J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots to the mechanical impedance. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 22, n.4, p. 305-318, 1974.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v.28:,n.5,p.797-804, 2004.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationship of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 422-427, 1985.

SIDIRAS, N. & VIEIRA, M.J. Comportamento de um Latossolo Roxo Distrófico, compactado pelas rodas do trator na semeadura - rendimentos de três culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.10, p.1285-1293, 1984.

SILVA, A. R.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.207-216, 2006.

SILVA, M. S. L. da; KLAMT, E.; CAVALCANTI A. C.; KROTH, P. L. Adensamento subsuperficial em solos do semi-árido: processos geológicos e/ou pedogenéticos. R **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.314-320, 2002a.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II - Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1, p.9-15, 2002b.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.973-983, 2003 a.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, E. A. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROCHA, J. V.; SOUZA, E. G. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003b.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho- Escuro e de um Podzólico Vermelho- Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.239-249, 2000.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n.2, p. 253-260, 2001.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.191-199, 2000b.

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

STOLF, R.; THURLER, Á. DE M.; O. O. S. B.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p. 447-459, 2011.

STOLF, R. Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19, 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1990. Vol. II, p. 823-837.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de formulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v15, p.229-235, 1991.

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.

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

SUZUKI, L. E. A. S.; LIMA, C. L. R. DE; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; PILLON, C. N. Condição estrutural de um argissolo no rio grande do sul, em floresta nativa, em pastagem cultivada e em povoamento com eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.22, n.4, p.833-843, 2012.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n.2, p. 111-119, 1991.

TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. 1991. 85 f. Dissertação (Mestrado em solos) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1991.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.; GUIMARÃES, M.F.;FONSECA, I.C.B. Resistência 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.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n.2, p.393-399, 1999.

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.

TSEGAYE T.; HILL R.L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements. **Soil Science**, v.163, n.2, p.155-165, 1998.

TURNER, n. c. Further progress in crop water relations. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.58, n.1, p.293-325, 1997.

VALICHESKIR, R. ; GROSSKLAUS, F.; STÜRMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.9, p.969-977,2012.

VEPRASKAS, M.J., MINER, G.S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root-growth. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.50, n.2 p.423-427, 1986.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. IN: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R., eds. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 1-53.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114f. Tese (Doutorado em Levantamento do Solo e Fotopedologia) - Universidade estadual Paulista, Botucatu, 2001.