

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**Cândida Regina Müller**

**COMPACTAÇÃO EM ARGISSOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE  
VEÍCULO BLINDADO DE COMBATE**

**Santa Maria, RS  
2019**

**Cândida Regina Müller**

**COMPACTAÇÃO EM ARGISSOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE VEÍCULO  
BLINDADO DE COMBATE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício de Araújo Pedron

Santa Maria, RS  
2019

Müller, Cândida Regina  
COMPACTAÇÃO EM ARGISSOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE  
VEÍCULO BLINDADO DE COMBATE / Cândida Regina Müller.- 2019.  
49 p.; 30 cm

Orientador: Fabrício de Araújo Pedron  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2019

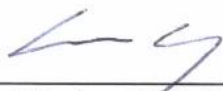
1. Tanque de guerra 2. Capacidade de suporte de  
carga 3. área militar I. Pedron , Fabrício de Araújo  
II. Título.

**Cândida Regina Müller**

**COMPACTAÇÃO EM ARGISSOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE VEÍCULO  
BLINDADO DE COMBATE**

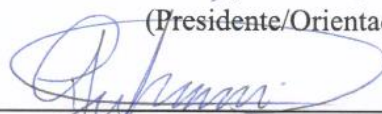
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo.

**Aprovada em 16 de agosto de 2019:**



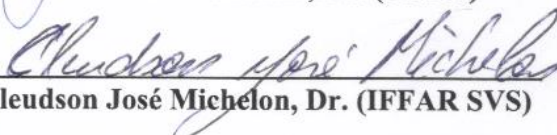
---

**Fabrício Araújo Pedron, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)**



---

**Cleudson José Michelin, Dr. (IFFAR SVS)**

Santa Maria, RS  
2019

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço àquele que me ilumina e me dá forças para sempre acreditar e ter fé naquilo que sonho.*

*À minha família que ama incondicionalmente, que sempre me apoia e me dá suporte para nunca desistir. Ao meu pai que é um grande amigo e conselheiro, sempre me incentivando e trazendo as palavras de otimismo “tudo vai dar certo”. À minha querida mãe e guerreira que sempre está presente. Ao meu irmão que sempre me aconselhou e ajudou em tudo, fosse nas madrugadas ou qualquer outro horário, e que também é minha inspiração em amar aquilo que fazemos e por ser um professor completo e um grande educador.*

*Ao meu orientador professor Fabrício de Araújo Pedron, por desde o primeiro contato ser tão gentil e querido comigo. Senti-me desde a primeira conversa acolhida e recebida com enorme carinho. Também agradeço por todas as oportunidades, conselhos, conhecimento e paciência. Grata pela confiança e apoio.*

*À professor Andréa Nummer por apoiar e inserir a pesquisa junto ao programa do exército com a UFSM.*

*Agradeço ao professor Paulo Ivonir Gubiani, por toda paciência (que fora bastante), por contribuir com seu conhecimento e sempre ajudar, mesmo aos domingos de descanso ouvindo meus longos áudios. Grata por toda dedicação e orientação.*

*Ao professor Ricardo Simão Diniz Dalmolin meu muito obrigada, és um grande professor e educador. Nunca esquecerei de quando se ofereceu a me ajudar na pesquisa. Fonte de inspiração.*

*Ao professor Ricardo Bergamo Schenato, sou muito grata pela disponibilidade e ajuda, principalmente quanto à estatística. Meus mais sinceros agradecimentos.*

*Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria e ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo por possibilitar o processo de ensino-aprendizagem e contribuir com a construção do conhecimento científico e ético.*

*A todos os professores, funcionários e alunos do Departamento de Ciência do Solo. Em especial aos professores Sandro José Giacomini, José Miguel Reichert, Zaida Inês Antonioli, Rodrigo Josemar Seminoti Jacques, Jean Paolo Gomes Minella. Ao professor Celso Aita, admiro-te pelo conhecimento que tens e pela forma animada que conduz as aulas. És um grande professor. Ao técnico e responsável pelo Laboratório de física do solo da UFSM Fonti, obrigada pelos ensinamentos, pelos bolos maravilhosos e pela confiança. Agradeço também a todas as moças da limpeza, aos seguranças e servidores da portaria do CCR.*

*A todos os professores responsáveis pela minha formação, meu sincero agradecimento por seus saberes e princípios compartilhados.*

*Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa, fundamental para eu conseguir realizar a pesquisa.*

*Grata pela parceria e todo apoio do diretor do CISM e do CIBLd. Em especial ao Comandante do centro de Instrução de Blindados: Coronel Carlos Alexandre Geovanini Santos. Também ao Major Cristiano Dorneles de Souza, ao Major Fernando Andrade Sena, ao Capitão Marcelo Radé, ao Coronel Rodolfo Augusto Crass e ao 1º Sargento Elisandro Rodrigues Sauzem. Grata por todo apoio e confiança!*

*Agradeço aos colegas da Pós-Graduação, ao pessoal do laboratório de Pedologia Física do solo da UFSM. Este agradecimento terá que ser amplo, pois eu me lembro com muit*

*carinho de vários nomes, e que acabarei não comentando, mas isso só mostra quão bem rodeada eu estava, como eu tive contato com pessoas tão queridas e vou guardar cada uma com um enorme carinho. Grata por tudo.*

*Um agradecimento especial a Camila Maia por toda ajuda nas análises dos dados, por estar sempre contente e me recebendo com um sorriso no rosto alegre e doce. Grata por todas as vezes que me confortou e me abraçou quando os tempos estavam difíceis e a tristeza estava presente.*

*Agradeço ao Nicolas Rosin, por ser esse querido e prestativo guri e ao Guilherme que sempre foram uns amores.*

*Ao pessoal do laboratório de Física do Solo, que sempre que precisei de alguma ajuda estavam disponíveis e foram queridos. Um agradecimento muito especial ao Douglas Scheid e ao Alan Batistão, senti-me como amiga de vocês. Grata por todas as ajudas, pelos ensinamentos, por serem tão queridos e atenciosos.*

*Agradeço aos amigos. Este é outro agradecimento que deve ser amplo, pois eu tenho muitos amigos e isso é um privilégio. Agradeço aos amigos de Santa Cruz, às amigas da UERGS, aos amigos que fiz em Pelotas e na UFPEL e aos novos amigos que fiz em Santa Maria e na UFSM.*

*Sempre tive sorte em morar com pessoas queridas e que me geraram uma importante amizade, agradeço às meninas e ao Bel que dividi apartamento em Santa Maria. Em especial a Amanda que sempre me ajudou, esteve presente e me incentivou a não desistir, e também por não me deixar morrer de fome, porque ela cozinha super bem.*

*Uma parte desse processo de trabalho tive o prazer de conhecer minha gatinha Lola Cristina (in memorian). Obrigada por ser um pacotinho de amor e estar comigo, preenchendo a ausência da família. Sou grata por todo amor que me deste. Quisera nós se pudessemos nascer sabendo amar como os animais.*

*Há sempre aqueles colegas que dispomos de maior tempo compartilhado e por este, firmamos amizade e temos um grande carinho. Obrigada de coração à colega Daniely Vaz Rodrigues da Silva, você é um amor, e sempre me sinto bem ao seu lado. Grata por tudo. Agradeço toda ajuda, atenção e disponibilidade da querida Miriam Rodrigues, que fora muito importante para que este trabalho fosse realizado. Grata por seus ensinamentos e pela atenção que teve comigo. Um obrigado carinhoso à Taciara Zborowski Horst. Taci, já é uma professora completa. Detém de muito conhecimento e sabedoria e ainda tem a didática e o carinho que poucos professores tem, só àqueles que tem essa profissão marcada no coração. Sou muito grata por tudo e devo dizer que és uma inspiração pra mim. Obrigada por sempre estar disponível de forma amável a ajudar o próximo. Agradeço também, a minha colega Beatriz Wardzinski Barbosa. Dividimos muito tempo de laboratório, de conversas e diversos momentos. Agradeço pelos momentos vividos, pela parceria no trabalho e execução de toda essa pesquisa. Grata por tudo, guardo-as com muito carinho no coração!*

*Em suma, agradeço a todos que contribuíram para que eu conseguisse completar essa jornada e realizar este trabalho. Vocês fazem parte da minha história e estão em meu coração*

*“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção”.*  
*(Paulo Freire)*

## RESUMO

### COMPACTAÇÃO EM ARGISSOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE VEÍCULO BLINDADO DE COMBATE

AUTORA: Cândida Regina Müller  
ORIENTADOR: Fabrício de Araújo Pedron

O tráfego intenso e contínuo de máquinas de grande porte causa compactação do solo, o que reduz a sua qualidade física e aumenta a sua susceptibilidade à erosão hídrica. Os exercícios de treinamento militar com veículos de combate causam danos diretos ao solo e à vegetação, afetando o ecossistema. Um grande contingente do exército brasileiro realiza treinamentos com veículos blindados de combate no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM), o que tem causado degradação do solo. Nosso objetivo foi avaliar o efeito do tráfego de veículos blindados de combate nas propriedades físicas do solo. O estudo foi conduzido em um Argissolo Vermelho-Amarelo do Campo de Instrução de Santa Maria com histórico de tráfego de veículo militares. O efeito da direção e da intensidade de tráfego sobre as propriedades físicas do solo foi avaliado em condições de alta umidade do solo ( $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), sob (i) o tráfego do veículo de combate Leopard 1 A5BR em linha reta com 0, 1 e 3 passadas, e (ii) o tráfego do veículo com a manobra de pivotamento com 0, 1 e 2 pivotamentos. A morfologia do solo, a distribuição granulométrica e o teor de carbono orgânico foram analisadas nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m. A densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, a condutividade hidráulica do solo saturado, a resistência à penetração e a pressão de preconsolidação foram avaliadas nas camadas de 0,00-0,04, 0,10-0,14 e 0,20-0,24 m. A pressão de preconsolidação da camada superficial indicou que o solo é susceptível à compactação pelo tráfego do Leopard 1A5BR se o conteúdo de água estiver acima de  $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Como o conteúdo de água no solo estava alto ( $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) no momento do tráfego, apenas um tráfego em linha reta e uma manobra de pivotamento foram suficientes para aumentar a resistência do solo à penetração e a densidade e reduzir a porosidade total e a macroporosidade na camada superficial (0,00-0,04 m).

**Palavras-chaves:** Tanque de guerra, capacidade de suporte de carga, área militar.



## ABSTRACT

### COMPACTION IN ALISOL AFTER THE TRAFFIC OF A COMBAT ARMORED VEHICLE

Author: Cândida Regina Müller  
Professor: Fabrício de Araújo Pedron

Heavy and continuous traffic from large vehicles causes soil compaction, which reduces their physical quality and increases their susceptibility to water erosion. Military training exercises with combat vehicles cause direct damage to soil and vegetation, affecting the ecosystem. A large contingent of the Brazilian Army conducts training with armored combat vehicles at the Santa Maria Instruction Field (CISM), which has been caused soil degradation. Our objective was to evaluate the effect of armored combat vehicle traffic on the physical properties of the soil. The study was conducted on an Abrupt Alisol of CISM with a history of military vehicle traffic. The effect of driving direction and traffic intensity on soil physical properties was evaluated under conditions of high soil moisture ( $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) under (i) straight traffic of the Leopard 1 A5BR combat vehicle, with 0, 1 and 3 passes, and (ii) pivoting maneuver with 0, 1 and 2 pivots. Soil morphology, particle size distribution and organic carbon content were analyzed in the 0.00-0.10 and 0.20-0.30 m layers. Soil density, total porosity, macroporosity, microporosity, saturated soil hydraulic conductivity, penetration resistance and preconsolidation pressure were evaluated in the 0.00-0.04, 0.10-0, 14 and 0.20-0.24 m. Preconsolidation pressure of the surface layer indicated that the soil is susceptible to traffic compaction of Leopard 1A5BR if the water content is above  $0.33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . As soil water content was high ( $0.3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) at the time of traffic, only one pass and one pivoting maneuver were sufficient to increase soil penetration resistance and density and reduce soil total porosity and macroporosity in the surface layer (0.00-0.04 m).

**Keywords:** Battle tank, cargo carrying capacity, military area.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
2.1 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS.....	11
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	15
3.1 OBJETIVO GERAL .....	15
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	15
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	15
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	15
4.2 HISTÓRICO DE USO DA ÁREA DO CISM COM VIATURAS BLINDADAS .....	17
4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	19
4.4 DADOS TÉCNICOS DA VIATURA UTILIZADA NO ESTUDO.....	21
4.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO E COBERTURA VEGETAL .....	22
4.6 COLETA E ANÁLISES DE SOLO.....	23
4.7 ESTATÍSTICA .....	25
<b>5 RESULTADOS</b> .....	26
5.1 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO E COBERTURA VEGETAL DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	26
5.2 COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DO SOLO SOB EFEITO DO TRÁFEGO .....	29
<b>5.2.1 Estudo 1: Tráfego em linha reta</b> .....	30
<b>5.2.2 Estudo 2: Tráfego em pivotamento</b> .....	34
<b>6 DISCUSSÕES</b> .....	38
6.1 TRÁFEGO EM LINHA RETA.....	38
6.2 TRÁFEGO EM PIVOTAMENTO.....	40
6.3 IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS MILITARES NO CISM 41	
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	41
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	42
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

O tráfego intenso e contínuo de máquinas de grande porte pode causar compactação do solo, reduzindo sua qualidade física e aumentando sua susceptibilidade à erosão hídrica. A infiltração de água e as trocas gasosas no solo são prejudicadas pela compactação, comprometendo a infiltração de água e atividade microbiana, gerando impactos indiretos como erosão e assoreamento dos rios.

As guerras sempre estiveram presentes na história das civilizações. Interesses pela defesa do país motivaram o aumento da demanda por melhorias nos equipamentos utilizados em operações militares. Com o desenvolvimento tecnológico os veículos de combate evoluíram e se tornaram maiores e mais pesados. Da mesma forma, os efeitos negativos sobre o solo tiveram impactos cada vez maiores, o que despertou interesse por estudos em áreas de treinamento militar.

Trabalhos sobre a degradação dos solos pelo uso militar ganharam destaque a partir dos anos 80 (ANDERSON et al., 2005). As principais publicações abordam sobre as alterações no ecossistema, o dano ou destruição da cobertura vegetal, as modificações e perdas de habitats naturais, os danos na estrutura dos solos e os processos erosivos (ALTHOFF; THIEN, 2005; ANDERSON et al., 2005; DEMARAIS et al. 1999; AYERS (1994); VAN DONK et al., 2003; PROSSER et al., 2000; THUROW et al., 1993). A grande maioria dos trabalhos se concentra no sudoeste dos Estados Unidos (ANDERSON et al., 2005), limitando a compreensão em outras condições ambientais, em razão da compactação do solo ser condicionada por uma série de fatores, como do veículo (peso, tipo de rodado, manobras executadas, número de tráfego), do solo (textura, mineralogia e matéria orgânica) e do ambiente (clima e vegetação nativa).

Os poucos estudos em áreas militares no Brasil foram realizados no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM) com enfoque na erosão de estradas (PITTELKOW, 2013; FERNANDES, 2015; CORRÊA, 2015) e diagnóstico ambiental; (SANT'ANA, 2012). Nenhum estudo sobre as alterações das propriedades físicas do solo e como o mesmo se comporta com o tráfego de blindados foi realizado.

O CISM é uma área de treinamento militar localizada em Santa Maria, RS, com mais de 5 mil hectares dedicados a infantaria blindada brasileira. Os treinamentos ocorrem praticamente o ano todo e contam com um grande número e variedade de equipamentos. Cerca de 140 viaturas blindadas de combate e mais um contingente de viaturas menores são utilizados

ao longo do ano. Uma das viaturas mais usadas no CISM é o Leopard 1A5BR, de fabricação alemã, com peso de combate de até 42 Mg.

A maior parte do contingente nacional dessa viatura está alocada nas unidades militares de Santa Maria, e o seu uso intenso no CISM tem promovido a degradação de estradas, de campos e margens de cursos d'água das áreas de treinamento. Já foram documentados casos de áreas onde os treinamentos se tornaram inviáveis devido à degradação do ambiente. Neste contexto, informações sobre as alterações das propriedades físicas do solo e como o mesmo se comporta com o tráfego de blindados são de interesse do Exército Brasileiro, para que planos de gestão sustentável e recuperação das áreas possam ser elaborados.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS**

O tráfego de grandes cargas causa deformações nos solos e a compactação é tida como a principal causa da degradação do solo na área agrícola e florestal (PENG et al., 2004). Embora as tecnologias tenham contribuído para a maior produtividade e facilidade ao homem no trabalho do campo, favoreceram também à degradação do ambiente. A preocupação com a qualidade do solo vêm sendo destaque no mundo científico e tem sido reportada por diversos autores nas últimas décadas.

As funções do solo podem ser limitadas pela compactação (AGUIAR, 2008; REICHERT et al., 2003; VENNIK, 2019). Alterações negativas nas propriedades físico-hídricas dificultam o solo a exercerem suas funções adequadamente, inibindo ou mesmo impedindo o crescimento de plantas, diminuindo a produtividade, interferindo na regulação de fluxos de energia e matéria do ambiente e filtro ambiental (REICHERT et al., 2003), além de sustentar a atividade biológica (CAMBI et al., 2015). Trabalhados como indicadores de qualidade do solo, os atributos que têm sido comumente medidos são densidade, porosidade, condutividade hidráulica e resistência mecânica à penetração.

A magnitude das deformações no solo depende de fatores intrínsecos, como o solo, máquina e ambiente (RETTA et al., 2013). A classe de solo, textura, estrutura, teor de matéria orgânica, profundidade, localização no relevo e condições de umidade, bem como as características da máquina (tipo de rodado, peso do veículo e tempo de aplicação da carga) e

do ambiente (clima e vegetação nativa), são importantes fatores que condicionam à maior ou menor degradação do solo.

Outros aspectos importantes no processo de alteração das propriedades físicas do solo se referem ao tipo de manobra executada, o número de passadas do veículo e o tempo de utilização da área. As condições da vegetação também podem influenciar no impacto do tráfego de veículos, como a umidade do solo, espécies de plantas, estágio de crescimento das plantas e condições climáticas (chuva, temperatura) (AYRES, 1994).

A resposta de um solo à degradação por compactação é condicionada por suas características pedogenéticas. Cada classe de solo reage de maneira diferente, mesmo com a aplicação de uma mesma pressão (LARSON et al., 1980). A pressão aplicada sobre o solo gera tensões em superfície e em profundidade, promovendo a compactação de diferentes camadas. Quando a tensão gerada sobre o solo supera a resistência interna do mesmo à deformação, pode ocorrer maiores alterações nas propriedades físicas das camadas de maior profundidade (RICHART et al., 2005).

Comumente os solos que apresentam maior teor de argila têm em profundidade propagada a pressão, dando a estes solos uma camada compactada mais espessa (HORN, 1988). Solos mais arenosos possuem limitações quanto a capacidade de serem comprimidos (MCKERNAN, 1984), diferindo nas características de compactação do subsolo quando comparados à solos mais argilosos (PROSSER et al., 2000). Deste modo, solos de textura fina são mais susceptíveis à compactação que solos de textura grossa (MAGAGNOTTI et al., 2012; KHAN, 2012). Por outro lado, solos de textura arenosa são naturalmente frágeis devido à susceptibilidade aos processos erosivos (STRECK et al., 2018), que podem ter o quadro agravado quando compactado.

O teor de matéria orgânica varia conforme o solo e é responsável por fenômenos físicos e químicos do mesmo. Seu maior teor eleva a área superficial específica e as cargas superficiais dos solos, atuando também no comportamento físico sob efeito na formação de agregados e consistência. Esses por sua vez, interferem na distribuição do tamanho de poros e na sua estabilidade, que possuem relação com a compactação dos solos (BRAIDA et al., 2011). Solos que apresentam maiores teores de matéria orgânica exibem menor sinal de degradação estrutural e de compactação (CRUZ et al., 2003). A maior proteção física, no entanto, depende da textura do solo, através das ligações químicas entre as partículas minerais e a matéria orgânica (BRAIDA et al., 2010). Os autores observam que solos de textura arenosa, como o

Argissolo deste estudo, a matéria orgânica não tem grande influência na resistência à compressibilidade.

A condição hídrica de um solo quando exposto ao tráfego de veículos é determinante para a sua susceptibilidade à degradação (DIAS et al., 2012). Solos em condições de baixa umidade possuem a maior capacidade de suportar cargas, sendo a compactação não muito expressiva. Diferentemente do que ocorre quando a condição de umidade do solo é maior. A água acumulada no solo permite que haja o deslocamento das suas partículas, contribuindo para a maior condição de degradação, facilitando o processo de compactação (BRAUNACK; MALAFANT, 1988; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; DREWRY et al., 2008; RICHART et al., 2005).

Assim, a umidade influencia significativamente na pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ). A medida que aumenta a umidade no solo, os valores de precompactação diminuem. De modo que haja maior resistência do solo às pressões externas quando diminuída a sua umidade (SILVA; CABEDA, 2006). A  $\sigma_p$  também depende do tipo de solo. Solos de textura arenosa (menos coesivos) possuem alta permeabilidade, ocorrendo facilidade na drenagem, o que resulta na rápida compressibilidade (HOLTZ; KOVACS, 1981, SILVA et al., 2002). Por outro lado, os autores descrevem que solos de textura argilosa (mais coesos) possuem baixa permeabilidade, sendo a compressibilidade do solo controlada pelo tempo. Logo, fatores como porosidade, conectividade e distribuição nos solos também são condicionantes para a resposta a compressão dos solos.

Quando a pressão da carga aplicada no solo é inferior a  $\sigma_p$  a deformação é elástica, apresentando a característica de se recuperar. Já quando a pressão da carga aplicada é superior a  $\sigma_p$ , a deformação é plástica, dando ao solo a característica de não conseguir se recuperar e ocorrendo a compactação (HOLTZ; KOVACS, 1981). Todavia, Gubiani e colaboradores (2018), observaram que a relação entre  $\sigma_p$  e deformações elásticas e plásticas não são tão simples e devem ser melhor avaliadas, isso porque a  $\sigma_p$  pode não representar a mudança de um estado a outro.

A compactação do solo é resultante do somatório do tempo de permanência, relacionada à velocidade do tráfego e manobra, ao peso da carga e ao número de vezes que o solo é submetido a uma nova carga, conforme o histórico de tensões da área (HÅKANSSON e MEDVEDEV, 1995; PROSSER et al., 2000).

A maior exposição de uma carga em um solo contribuirá com a compactação do mesmo, logo, quanto mais lenta for a velocidade do tráfego e manobras, maior será o tempo da pressão aplicada, gerando maior degradação (HORN et al., 1988). E quanto mais pesada a carga

aplicada, maior é a pressão, e o efeito de compactação é mais expressivo (AYERS, 1994; ANDERSON et al., 2007; RETTA et al., 2013). Embora, estudos demonstrem que a superfície de contato pneu-solo pode minimizar efeitos danosos, pois veículos de lagarta tendem a compactar menos os solos quando comparados à veículos com pneus (PROSE; WILSHIRE, 2000), o maior peso do veículo acaba influenciando mais na compactação que o número de tráfego e dimensões do rodado, sendo o maior responsável pela compactação (RETTA et al., 2013).

A compactação modifica a taxa de infiltração e aeração do solo (WEBB, 2002), posto que há diminuição da macroporosidade e conectividade dos poros (BRAUNACK; WILLIAMS, 1993; FREDDI et al., 2007; BEUTLER et al., 2009), o que gera a redistribuição dos poros, tornando os solos mais resistente à penetração e aumentando sua densidade quando submetidos a cargas (ALTHOFF; THIEN, 2005; STRECK, C. et al., 2004; PERKINS et al., 2007; CARVALHO et al., 2011; BARIK et al., 2014).

A condutividade hidráulica de um solo saturado ( $K_s$ ) é a propriedade que expressa a facilidade com que a água percola no solo, deste modo ela está intrinsecamente ligada à sua porosidade. A quantidade, o tamanho, forma, orientação e continuidade dos poros irá inferir na maior ou menor condutividade hidráulica de um solo. Solos que passam por um processo de compactação, tendem ter sua condutividade hidráulica diminuída (PERKINS et al., 2007), devida a redução da macroporosidade.

As alterações dos atributos físicos do solo dificultam a infiltração de água no solo e aumentam o escoamento superficial, contribuindo com os processos erosivos do solo (VAN DONK et al., 2003). Mesmo que algumas classes de solos sejam susceptíveis naturalmente à erosão devido suas características morfológicas (STRECK et al., 2018), o tráfego de veículos retira a cobertura vegetal do solo, principalmente nas manobras de maior curvatura (RETTA et al., 2013; KANE et al., 2013), deixando o solo exposto e potencializando ainda mais a compactação e processos erosivos.

Além do peso do veículo, as variáveis de maior relevância para a compactação compreendem o número de passadas, a manobra de tráfego e a umidade do solo. A perturbação no solo aumenta conforme o número de passadas (BRAUNACK; WILLIAMS, 1993; RETTA et al., 2017). No entanto, o maior grau de deformação no solo ocorre logo após a primeira passada (AYERS, 1994; PROSSER et al., 2000; KANE et al., 2013). As manobras com maior curvatura degradam mais o solo que o tráfego em linha reta, principalmente pela retirada da cobertura vegetal (AYERS, 1994; KANE et al., 2013). E a condição hídrica úmida potencializa

os efeitos da compactação do solo (ALTHOFF; THIEN, 2005; BRAUNACK; WILLIAMS, 1993; CAMBI et al., 2015).

Considerando que a classe de solo predominante na área de estudo é o Argissolo, Beutler et al. (2009), Reichert et al. (2007) e Silva, S. et al. (2008), avaliando os efeitos da compactação, observaram a redução da macroporosidade, e o aumento da densidade e da resistência à penetração em profundidade.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o efeito do tráfego de veículo blindado de combate em propriedades físicas de um Argissolo franco arenoso com histórico de tráfego de viaturas militares.

#### **3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Determinar a magnitude do tráfego em linha reta da viatura blindada de combate Leopard 1A5BR nas propriedades físicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo;
- Determinar a magnitude do tráfego em pivotamento da viatura blindada de combate Leopard 1A5BR nas propriedades físicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo.

### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

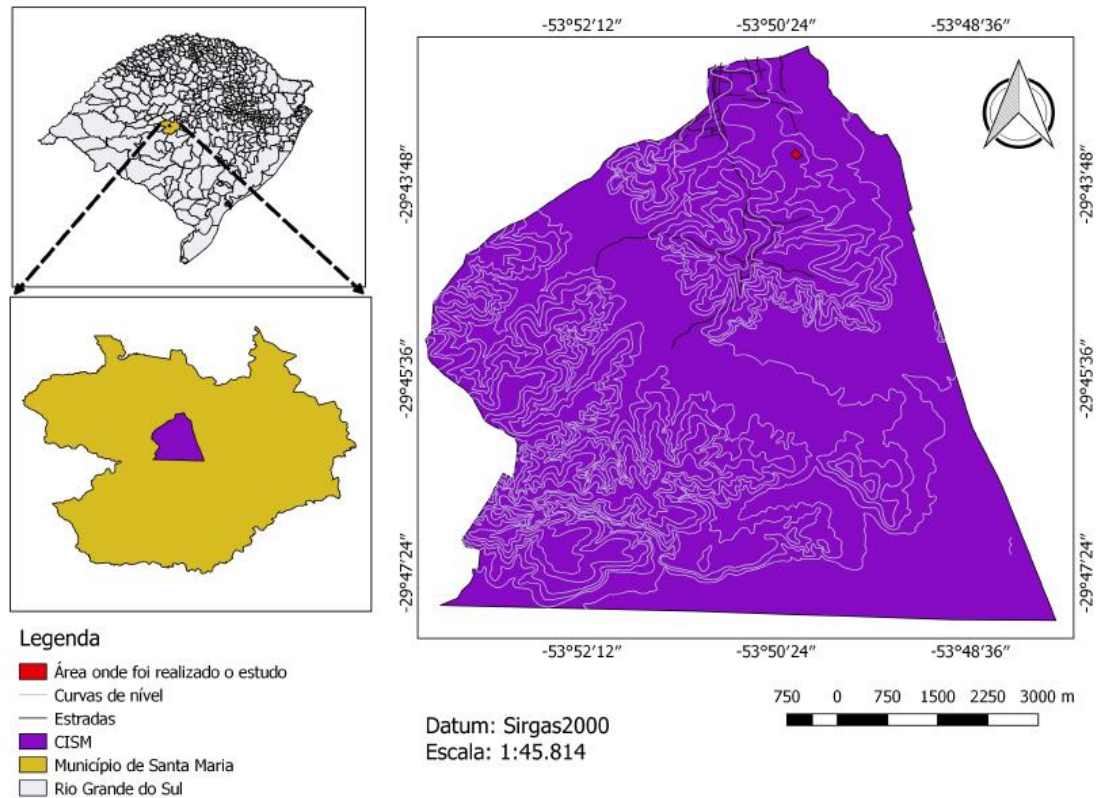
#### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

O estudo foi conduzido em uma área localizada no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM), pertencente ao Exército Brasileiro e utilizada para a instrução militar com viaturas blindadas de combate.

O CISM possui uma área de 586,7 km<sup>2</sup>, e está localizado no município de Santa Maria, região central do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 29°42'31'' e 29°47'39'' de latitude sul e 53°48'12'' e 53°53'23'' de longitude oeste (Figura 1). A via de acesso se dá pela BR 158, ao término da Avenida do Exército, bairro Boi Morto.



Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Autor (2019)

Na área do CISM são encontradas principalmente a Formação Santa Maria e Depósitos Aluvionares recentes. Na área onde foi conduzido o experimento predomina o Membro Alemoa da Formação Santa Maria, por vezes são encontradas zonas de transição com a sequência inferior Membro Passo das Tropas. As rochas do Membro Alemoa são compostas por siltitos argilosos e argilitos dispostos em camadas lenticulares intercaladas com lentes arenosas de espessura e extensão variada. Estas rochas formam as áreas de relevo suave a ondulado e apresentam baixa resistência aos processos erosivos (SANT'ANA, 2012).

O clima no município de Santa Maria é subtropical de verão úmido (Cfa), classificado como mesotérmico úmido, segundo a classificação climática de Köppen. Na região, a média anual varia de 18 a 20 °C, e a precipitação média anual é 1.750 mm (ALVARES et al., 2013).

Em decorrência da localização geomorfológica do município de Santa Maria, a área do CISM possui variação de relevo, predominando áreas onduladas a suave onduladas nas coxilhas sedimentares e planas nas várzeas.

O relevo atua na variação e distribuição dos solos no CISM. Nas áreas de maior altitude ocorrem, predominantemente, os Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos (Unidade São Pedro), em menores altitudes os Argissolos Bruno-Acinzentados (Unidade Santa Maria) e nas

regiões de várzeas, próximo aos arroios Cadena e Taquarichim, os Planossolos Háplicos e Gleissolos Háplicos (PEDRON et al., 2008; FLORES et al., 2015).

#### 4.2 HISTÓRICO DE USO DA ÁREA DO CISM COM VIATURAS BLINDADAS

No campo do CISM são vistas muitas áreas com grande degradação (figura 2a), principalmente nas estradas, onde já ocorrem processos avançados de erosão. Os treinamentos com as viaturas blindadas de combate ocorrem indiferente às condições pluviométricas. O tráfego em linha reta e cruzado (figura 2b) e a manobra de pivotamento (figura 2c) foram observadas em dias de treinamento com os veículos, antes da instalação deste experimento, na qual causaram grande impacto na cobertura vegetal e no solo, principalmente sob condições de alta umidade.

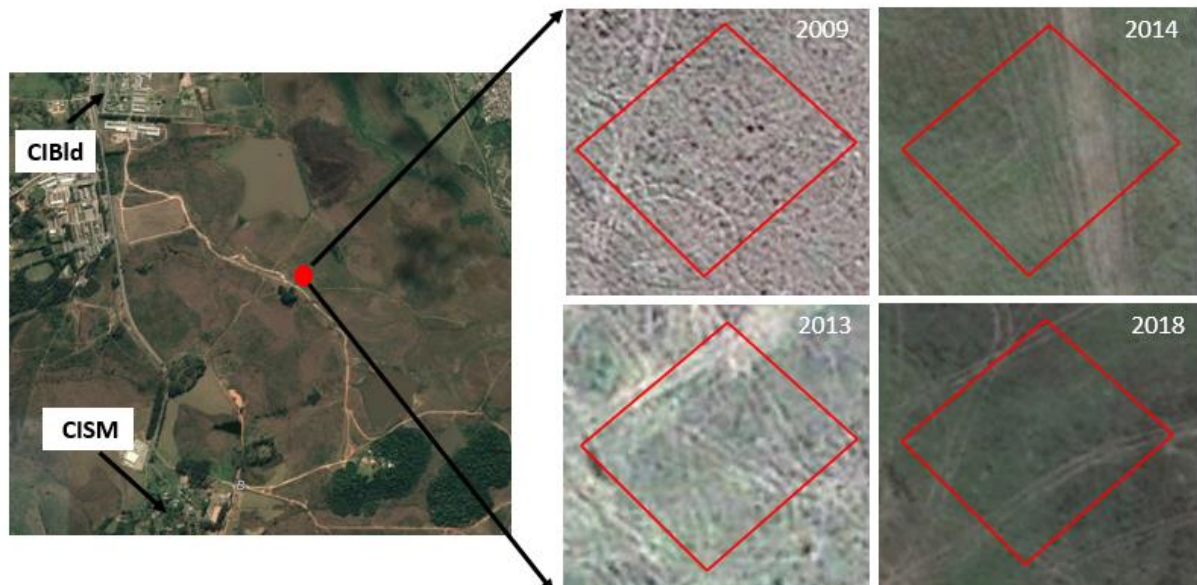
Embora existam indícios de que a área esteja compactada pelo tráfego desse tipo de veículos (SANT'ANA, 2012; CORRÊA, 2015; FERNANDES, 2015), não foram realizados estudos que comprovem que o tráfego desses veículos causa compactação do solo. Os treinamentos militares ocorrem em praticamente toda a área do CISM, exceto em algumas poucas áreas reservadas a manga de segurança. Na figura 3 é apresentado um conjunto de imagens de satélite do Google Earth de alguns anos no período de 2004 a 2018, que registram os rastros deixados na área pelo tráfego de viaturas blindadas de combate.

Figura 2 - Rastro causado pelo tráfego e retirada da cobertura vegetal do solo na área do CISM. a) estrada próxima a área de estudo. b) Rastros do tráfego dos blindados em dia de treinamento e c) Rastro da manobra de pivotamento em dia de treinamento.



Fonte: Autor (2019).

Figura 3 - Histórico de uso da área experimental no CISM.



Fonte: Google Earth Pro, 2017. Autor (2019)

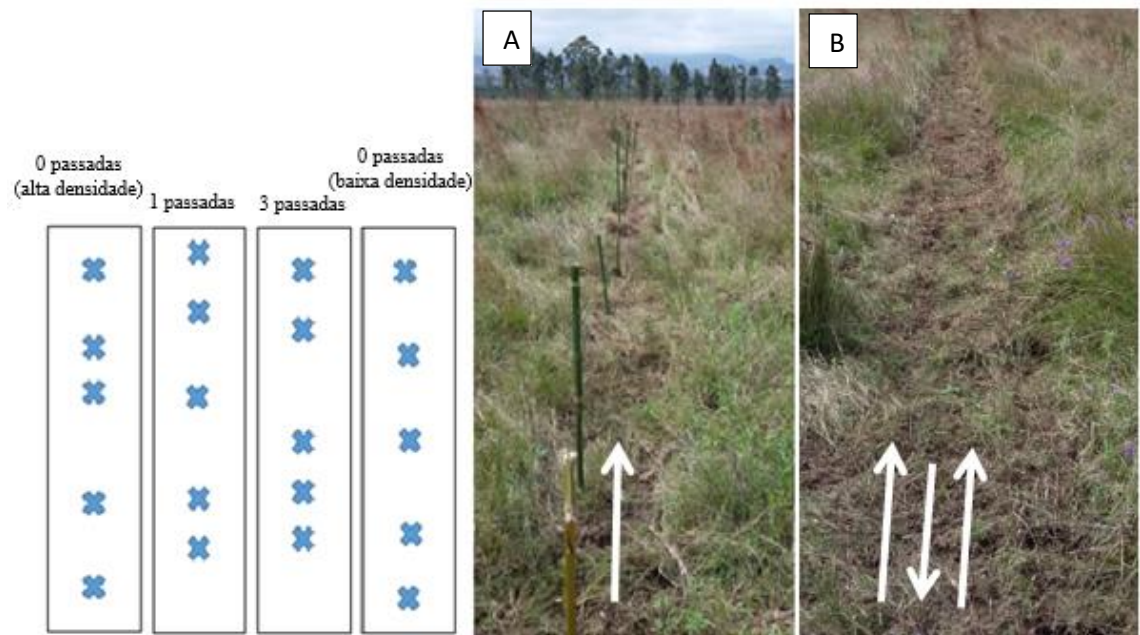
#### 4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A área total utilizada foi de aproximadamente 90 m<sup>2</sup>, dividida em dois experimentos. Um dos experimentos consistiu de tráfego em linha reta da viatura blindada de combate; o segundo consistiu de manobra de pivotamento. Essas duas modalidades de uso do veículo foram escolhidas porque são bastante utilizadas nos treinamentos e causam diferentes intensidades de perturbação do solo.

O blindado Leopard 1A5BR trafegou em linha reta com velocidade média de 15 km h<sup>-1</sup> pelo solo 1 vez, e, ao lado, outras 3 vezes. Ao lado da área de tráfego em linha reta, foram realizados os dois pivotamentos. Em seguida foram iniciadas as marcações das 5 repetições por tratamento do tráfego em linha reta (0, 1 e 3 passadas) e para os tratamentos dos pivotamentos (1 e 2 giros). Considerando que haveria variabilidade no solo devido ao histórico de tráfego de veículos blindados na área, o tratamento de 0 passadas foi amostrado em dois locais diferentes, um em cada lado da área experimental, em condições de alta densidade, representando a precompactação comum no terreno, e outro, em condição de menor densidade, representando uma situação mais próxima do natural.

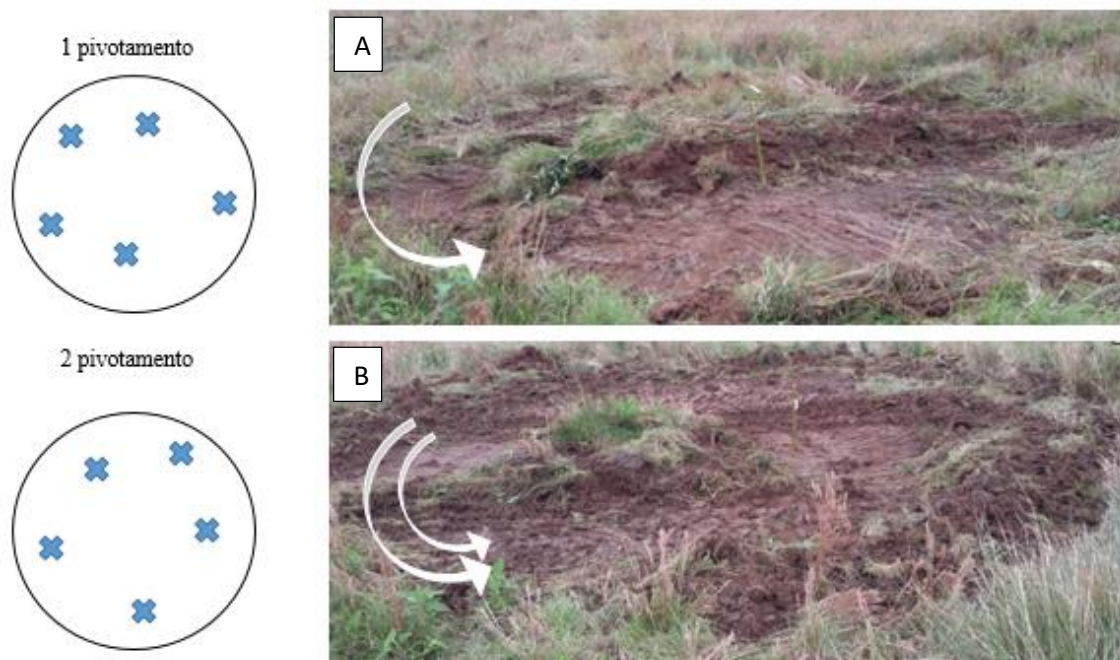
Os tratamentos foram representados pelas siglas: NT0a – sem tráfego no local de solo com alta densidade; NT0b - sem tráfego no local de solo com baixa densidade; NT1 – um tráfego em linha reta; NT3 – três tráfegos em linha reta; P1 – um pivotamento completo; P2 – dois pivotamentos completos. NT0b e NT0a foram utilizados como condição de referência em ambos os experimentos, sendo apenas renomeados como P0b e P0a quando usados no experimento com pivotamento. Para os tratamentos P1 e P2, o veículo blindado fez, respectivamente, um e dois movimentos de rotação completo em torno do seu próprio eixo, travando uma das lagartas. Em cada local trafegado (Figura 4 e 5), cinco parcelas (repetições) foram marcadas aleatoriamente. Ambos os experimentos foram considerados em delineamento inteiramente casualizado.

Figura 4: Experimento com posições (x) das 20 parcelas e os tráfegos em linha reta, com 1 nível de tráfego em linha reta (a) e três tráfegos em linha reta no mesmo lugar (b).



Fonte: Autor (2019)

Figura 5: Experimento com as posições (x) das 10 parcelas e das manobras de pivotamento, para um pivotamento (a) e dois pivotamentos (b).



Fonte: Autor (2019)

#### 4.4 DADOS TÉCNICOS DA VIATURA UTILIZADA NO ESTUDO

Foi utilizada a viatura blindada de combate **Leopard 1A5BR**, produzida na Alemanha, a qual possui um peso de aproximadamente 40,2 toneladas sem carga, chegando a 42,2 toneladas na ordem de combate.

Suas dimensões são de aproximadamente 7 m de comprimento (sem o canhão), 3,4 m de largura e 2,7 m de altura. O rodado do veículo é do tipo esteira, com largura de 55 cm e 4,2 m de comprimento e com *pad* de borracha alinhadas (figuras 6). A pressão estática exercida sobre o solo é de 87 kPa, no entanto, a pressão aplicada durante a realização das manobras não foi monitorada.

Figura 6 - Veículo Blindado de Combate Leopard 1A5BR utilizado no experimento (a: vista frontal, b: vista do rodado-esteira ou lagarta, c: vista lateral).



Fonte: Autor (2019).

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO E COBERTURA VEGETAL

A profundidade, espessura dos horizontes, cor, estrutura e consistência do perfil de solo foram descritas conforme Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2015). O perfil de solo foi exposto por meio da abertura de uma trincheira, ao lado das parcelas do experimento dos tráfegos, com aproximadamente 1,2 metros de profundidade, 1,5 metros de comprimento e 80 cm de largura.

A cobertura vegetal predominante na área foi caracterizada a partir da coleta de uma porção da biomassa acima do solo. Foram escolhidas 3 áreas de 1m<sup>2</sup>, cada uma sendo representativa de diferentes alturas de vegetação, com porte baixo (vegetação rasteira), médio (altura da vegetação intermediária) e alto (vegetação predominante arbustiva), respectivamente (Figura 7). O tamanho da vegetação foi determinado nas três situações conforme observado no campo, observando-se que a cobertura de tamanho médio predominava na área em que ocorreu o experimento. Em laboratório as amostras foram secas em estufa à 65°C por 48 horas e, posteriormente, sua massa seca foi determinada (HAYDOCK; SHAW, 1975).

Figura 7 – Delimitação da área para determinação da cobertura vegetal de porte baixo (a) médio (b) e alto (c).



Fonte: Autor (2019).

#### 4.6 COLETA E ANÁLISES DE SOLO

O efeito do tráfego no solo foi avaliado por meio da análise de densidade do solo ( $D_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ), microporosidade ( $M_i$ ), macroporosidade ( $M_a$ ) e condutividade hidráulica de solo saturado ( $K_s$ ). Para estas análises, uma amostra de solo com estrutura preservada foi coletada nas camadas de 0,00-0,04; 0,10-0,14 e 0,20-0,24 m de todas as parcelas. As amostras foram coletadas com anéis metálicos de 5,7 cm de diâmetro e 4 cm de altura. Para a determinação da distribuição granulométrica, umidade gravimétrica e carbono orgânico total, amostra de solo com estrutura não preservada foram coletadas nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m. A coleta e preparo das amostras foram feitas conforme protocolos descritos no Manual de Métodos de Análise do Solo (TEIXEIRA et al., 2017).

Resumidamente, a sequência de procedimentos em cada amostra com estrutura preservada foi: [saturação, pesagem], [drenagem sob tensão de 6kPa, pesagem], [ressaturação, determinação da  $K_s$ ], [secagem em estufa a 105°C, pesagem]. Também foram determinadas as massas do pano e do elástico (na saturação e na tensão de 6 kPa) e massa e dimensões do anel.

$$D_s = \frac{A}{B}$$

Em que  $D_s$  ( $Mg, m^{-3}$ ) é a densidade do solo,  $A$  é a massa da amostra seca a 105°C ( $Mg$ ) e  $B$  é o volume do anel ( $m^3$ ).

$$P_t = \frac{A - B - C}{D}$$

Em que,  $P_t$  ( $m^3 m^{-3}$ ) é a porosidade total,  $A$  é a massa da amostra de solo saturado (anel + solo saturado + pano + elástico) ( $kg$ ),  $B$  é a massa do pano + elástico ( $g$ ),  $C$  é a massa da amostra seca a 105°C ( $kg$ ),  $D$  é o volume do anel ( $m^3$ ).

$$M_i = \frac{A - B}{C}$$

Em que  $M_i$  ( $m^3 m^{-3}$ ) é a microporosidade,  $A$  é a massa da amostra após ser submetida à tensão de 6 kPa ( $g$ ),  $B$  é a massa da amostra seca a 105°C ( $g$ ),  $C$  é o volume do anel ( $cm^3$ )



$$Ma = Pt - Mi$$

Em que  $Ma$  ( $m^3 m^{-3}$ ) é a macroporosidade do solo.

$$Ks = \frac{Q \times L}{A \times H \times t}$$

Em que  $Ks$  ( $mm h^{-3}$ ) é a condutividade hidráulica de solo saturado,  $Q$  é o volume de água percolado ( $mm^3$ ),  $L$  é a altura do bloco do solo ( $mm$ ),  $H$  é a altura do bloco do solo e da coluna de água ( $mm$ ),  $A$  é a área do anel ( $mm^2$ ),  $t$  é o tempo (horas).

$$Ug = \frac{A - B}{B}$$

Em que  $Ug$  ( $kg kg^{-1}$ ) é a umidade gravimétrica,  $A$  é a massa da amostra úmida ( $kg$ ),  $B$  é a massa da amostra seca a  $105^\circ C$  ( $kg$ ). O valor da Umidade volumétrica ( $Uv$ ) do solo foi obtido com a multiplicação da  $Ug$  pela  $Ds$ .

A análise granulométrica foi feita por dispersão total, pelo método da pipeta, utilizando como dispersante químico o hidróxido de sódio ( $NaOH$ ).

O carbono orgânico total ( $C_{org}$ ,  $g kg^{-1}$ ) foi quantificado pelo processo de combustão úmida descrita por Nelson; Sommers (1982), através do método de Mebius no bloco digestor (adaptado por TEIXEIRA et al., 2017).

A resistência mecânica do solo à penetração ( $PR$ ) foi avaliada em campo, com um penetrógrafo digital com coletor automático de dados. A velocidade constante de penetração foi de  $2 cm s^{-1}$  e o cone possui  $1 cm$  de diâmetro com ângulo de  $60^\circ$ . Os dados foram obtidos a cada  $0,01 m$ , até  $0,5 m$  de profundidade, com cinco medições por nível e manobra de tráfego. Concomitante à medição da resistência mecânica do solo à penetração amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas, pesadas e mantidas em estufa a  $105^\circ C$  até atingirem peso constante. O conteúdo gravimétrico de água dessas amostras foi multiplicado pela densidade da camada correspondente para determinar o conteúdo volumétrico de água do solo.

A capacidade de suporte de carga do solo foi avaliada em um outro conjunto com 36 amostras com estrutura preservada coletadas em anéis metálicos com  $0,03 m$  de altura e  $0,057 m$  de diâmetro, nas camadas de  $0,00-0,04$ ,  $0,10-0,14$  e  $0,20-0,24 m$  do nível sem tráfego  $NT0_b$  (tratamento com menor alteração do solo).

Essas amostras foram divididas em quatro grupos contendo nove amostras por grupo, sendo três amostras de cada camada de solo por grupo, para garantir a variação de  $D_s$  dentro dos grupos. As amostras foram saturadas e, posteriormente, um grupo foi submetido à tensão de 6 kPa e outro à tensão de 10 kPa, em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006). Outro grupo foi submetido à tensão de 100 kPa, utilizando um extrator de placa de pressão (KLUTE, 1986). Um outro grupo foi submetido à tensão de 100 kPa e, posteriormente, teve perda de água por evaporação afim de atingir umidade relativa à tensão de 1000 kPa.

Após o equilíbrio da umidade das amostras em cada tensão, as amostras foram pesadas, para a determinação do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), e submetidas à consecutivas cargas estáticas de 0, 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, por um período de 5 minutos para cada carga (SILVA et al., 2000), em uma prensa de compressão uniaxial. Em seguida, as amostras foram transferidas para estufa a  $105^\circ \text{C}$ , até atingirem peso constante, para a determinação da  $D_s$ .

A capacidade de suporte de carga do solo foi estimada pela pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), que foi determinada em cada amostra pelo método de Casagrande (1936), utilizando o suplemento SCC (GUBIANI et al., 2017). Um modelo não linear ( $\sigma_p = a D_s^b \theta^c$ ;  $a$ ,  $b$  e  $c$  correspondem aos parâmetros de ajuste) descrito por Busscher (1990), foi justado ao conjunto de dados.

#### 4.7 ESTATÍSTICA

O carbono orgânico e a granulometria do solo foram analisados por meio de estatística descritiva. Os demais dados ( $D_s$ ,  $P_t$ ,  $M_a$ ,  $M_i$ ,  $K_s$ ,  $R_P$  e umidade) foram submetidos à análise de variância estatística e quando houveram diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. Os dados que foram significativos à não normalidade foram submetidos à transformação raiz quadrada. As análises estatísticas foram realizadas com uso do software Sisvar.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO E COBERTURA VEGETAL DA ÁREA EXPERIMENTAL

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Ta Distrófico abruptico (SANTOS et al., 2018) (Figura 8). Foi observado no campo que o horizonte Au corresponde a uma camada com queimada (presença de fragmentos de carvão) e o horizonte Ap corresponde a um horizonte que sofreu efeitos do revolvimento anual pelo uso agrícola anterior a instalação do campo de instrução. No horizonte Ap verificou-se uma compactação concentrada na profundidade de 10 a 15 cm, evidenciada pela estrutura laminar/maciça. Os horizontes superficiais continham muitas raízes, que ficam comuns nos horizontes A1 e A2 e raras nos horizontes E, Bt<sub>1</sub> e Bt<sub>2</sub>.

Figura 8 – Paisagem e perfil do solo da área de estudo: Argissolo Vermelho-Amarelo Ta Distrófico abruptico.



Fonte: Autor (2019).

A grande maioria dos horizontes do perfil de solo possuem consistência úmida friável, apenas os horizontes Ap e Bt<sub>2</sub> possuem consistência firme (tabela 1). Em relação à consistência molhada, o solo é não plástico, exceto no horizonte Bt<sub>2</sub>, não pegajoso e ou ligeiramente pegajoso ao longo de quase todo perfil. A estrutura predomina moderada com blocos angulares

e subangulares, exceto nos horizontes Au e Ap, com estrutura granular e laminar, respectivamente.

O solo possui baixo teor de matéria orgânica e pH ácido, com saturação por bases inferior a 50% (tabela 2). Os teores de argila aumentam em profundidade até o horizonte A<sub>2</sub> e diminuem no horizonte eluvial, havendo o incremento abrupto para os horizontes subsuperficiais. A classe textural é franco-arenosa ao longo de todo perfil modificando apenas no horizonte Bt<sub>2</sub> que apresenta a classe textural franco-argilosa.

Tabela 1 - Dados morfológicos do perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo da área do CISM.

Hor.	Prof. (m)	Cor úmida	Transição	Consistência		Estrutura	Feições especiais
				Úmida	Molhada		
Au	0,00-0,03	10YR 4,5/2	pl e abr	Fr	np e npg	mod., md.,grnl.,peq.	-
Ap	0,03-0,15	10YR 3,5/6	pl e cl	F	np e npg	mod., md., lmr. (compactação)	-
A <sub>1</sub>	0,15-0,45	10YR 3/1	pl e gr	Fr	np e npgp	mod., md. a peq., blc. ang e sbg.	-
A <sub>2</sub>	0,45-0,70	10YR 3/2	pl e gr	Fr	np e npgp	frac., md. a peq., blc ang. e sbg.	-
E	0,70-0,90	10YR 4/3	pl e abr	Fr	np e npg	frac., md. a peq., blc ang. e sbg.	-
Bt <sub>1</sub>	0,90-1,05	5YR 3/4	pl e cl	Fr	np e lpg	mod., grand. a peq., blc ang. e sbg.	2% plint.
Bt <sub>2</sub>	1,05-1,20+	5YR 3,5/3,5	-	F	p e pg	mod. a fort., grand. a peq., blc ang. e sbg.	2% petropl.

Hor – horizonte; pl – plana; abr – abrupta; cl – clara; gr – gradual; fr – friável; f – firme; np – não plástica; npg – não pegajosa; npgp – não pegajosa a ligeiramente pegajosa; lpg – ligeiramente pegajosa; p – plástica; pg – pegajosa; mod – moderada; md – média; peq – pequena; grand – grande; frac – fraca; fort – forte; grnl – granular; lmr – laminar; blc ang – bloco angular; sbg – subangular; plint – plintitas; petropl – petroplintitas. As plintitas são avermelhadas/laranjadas de 0,5 a 1 cm de diâmetro e as petroplintitas ferruginosas possuem de 0,1 a 0,3 cm.

Tabela 2 - Dados químicos e granulométricos do perfil de Argissolo Vermelho da área do CISM.

Hz	MO (%)	pH água 1:1	Saturação (%)		CTC efet. (cmol/dm <sup>3</sup> )	CTC pH7	Areia	Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Argila	Classe textural (Santos, R. et. al., 2015)
			Al	Bases						
Au	3,2	5	10,8	34,7	3,7	9,5	652	253	95	Franco-arenosa
Ap	1,3	4,3	67,7	8,5	3,1	11,9	657	245	98	Franco-arenosa
A <sub>1</sub>	1,5	4,5	37,5	22,6	4,0	11,2	639	255	106	Franco-arenosa
A <sub>2</sub>	1,1	5	24,3	22,1	3,7	12,5	613	281	106	Franco-arenosa
E	0,5	5	28,6	30,5	2,1	5,0	632	302	66	Franco-arenosa
Bt <sub>1</sub>	0,8	4,8	15,8	31,5	3,8	10,1	552	288	160	Franco-arenosa
Bt <sub>2</sub>	1,0	4,6	27,3	23,8	6,6	20,2	408	238	354	Franco-argilosa

A média das frações granulométricas são semelhantes nas duas profundidades e a maior quantidade de carbono orgânico está em superfície (tabela 3). Pode-se inferir homogeneidade na textura do solo e no teor de carbono orgânico total para toda a área experimental, pois são baixos os valores de desvio padrão e coeficiente de variação nas duas camadas indicando menor dispersão dos dados em relação as médias.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica e de carbono orgânico total do solo em profundidade na área experimental

	Granulometria (g kg <sup>-1</sup> )			C org (g kg <sup>-1</sup> )
	Areia	Silte	Argila	
<b>0,00-0,04 m</b>				
Média	666,5	228,1	105,4	13,7
Desvio Padrão	23,3	15,3	13,6	2,5
CV (%)	3,5	6,7	12,9	18,4
Mínimo	629	192	89	11,05
Máximo	710	251	133	18,3
<b>0,20-0,24 m</b>				
Média	655,6	215,5	128,9	6,3
Desvio Padrão	28	19,7	30,4	0,68
CV (%)	4,3	9,1	23,5	10,8
Mínimo	589	174	71	5,3
Máximo	698	259	192	7,6

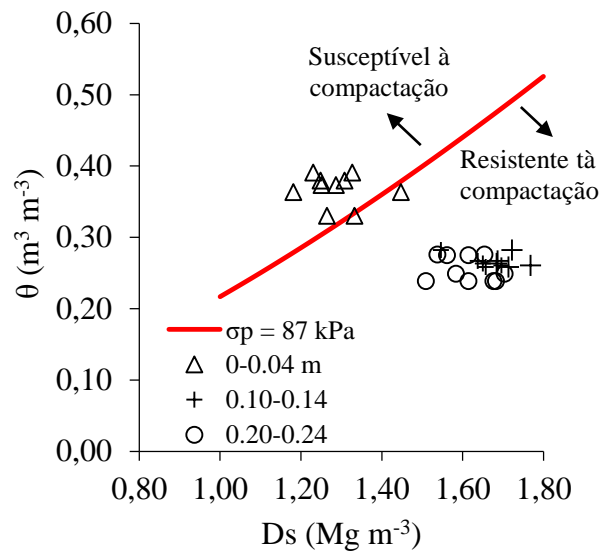
CV = Coeficiente de variação.

A massa seca da parte aérea da vegetação foi 7,8; 9,7 e 10,6 Mg ha<sup>-1</sup> nos locais com vegetação de porte baixo, médio e alto, respectivamente. As principais espécies vegetais herbáceas e arbustivas encontradas no local foram o capim-rabo-de-burro (*Andropogon bicornis* L. e *Schizachyrium microstachyum* (Desv. Ex Ham.) Roseng), capim-barba-de-bode (*Aristida jubata* (Arechav.) Herter), carqueja (*Baccharis trimera* (Less.) DC.), caraguatá (*Eryngium elegans* Cham. Et Schlecht; *Eryngium ciliatum* Cham. & Schltl), pega-pega (*Desmodium incanum* (Sw.) DC), guanxuma (*Sida rhombifolia* L.), capim-annoni (*Eragrostis plana* Nees) e grama-forquilha (*Paspalum notatum* Fluegge).

## 5.2 COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DO SOLO SOB EFEITO DO TRÁFEGO

No modelo ajustado  $\sigma_p = 13,22526Bd^{1,85651}\theta^{-1,23313}$  todos os coeficientes foram significativos ( $p \leq 0,05$ ), e o coeficiente de determinação foi  $R^2 = 0.74$ . Fixando na equação uma  $\sigma_p$  de 87 kPa, que é a carga estática do Leopard 1A5BR, as combinações de  $D_s$  e  $\theta$  que resultam  $\sigma_p$  de 87 kPa geram uma curva no plano ortogonal  $\theta$ - $D_s$  (Figura 9). Acima da linha estão combinações ( $\theta$ ;  $D_s$ ) para as quais o tráfego blindado compactaria o solo; abaixo da linha estão combinações ( $\theta$ ;  $D_s$ ) para as quais o tráfego não compactaria o solo. Embora o tráfego tenha ocorrido com  $\theta$  próximo ao de capacidade de campo, as combinações de  $\theta$  e  $D_s$  determinadas nas parcelas NT0a no momento de aplicação do tráfego nas outras parcelas (pontos na Figura 9) indicam que o tráfego aconteceu em condição de solo desfavorável à compactação pelo veículo testado nas profundidades de 0,10-0,14 e 0,20-0,24 m e favorável na camada de 0,00-0,04 m.

Figura 9- Combinações de  $B_d$  e  $\theta$  que resultam  $\sigma_p$  de 87 kPa (carga estática do Leopard 1A5 BR) usando a equação (1) parametrizada para o solo deste estudo.



Fonte: Autor (2019).

### 5.2.1 Estudo 1: Tráfego em linha reta

A  $D_s$  diferiu significativamente entre os níveis de tráfego nas camadas de 0,00-0,04 m e de 0,20-0,24 m (Figura 10). A  $D_s$  diferiu significativamente entre NT0b e NT1 e NT3 na camada de 0,00-0,04 m. O NT0a diferiu apenas do NT3 na mesma camada. As áreas submetidas a uma e três passadas não diferiram entre si. A  $D_s$  aumentou de 1,25 para 1,51  $\text{Mg m}^{-3}$  na camada superficial (0,00-0,04 m) após três passadas do veículo blindado. A camada de 0,10 a 0,14 m teve as maiores  $D_s$  para todas as intensidades de tráfego, com  $D_s$  aproximado de 1,70  $\text{Mg m}^{-3}$ , e não diferiu significativamente entre as passadas. Na camada de 0,20-0,24 m, o NT0b diferiu significativamente dos demais níveis de tráfego.

A  $P_t$  teve diferença significativa entre os níveis de tráfego para as três camadas analisadas. A  $P_t$  foi maior em superfície (0,00-0,04 m), em que teve redução de 0,52 a 0,40  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  após três tráfegos. A diferença ocorreu entre os tratamentos sem tráfego (NT0a e NT0b) e o NT3. O NT1 não diferiu das outras passadas. A segunda camada teve a  $P_t$  reduzida de 0,35 a 0,31  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  após as três passadas. A diferença estatística ocorreu entre o NT3 e os níveis sem tráfego (NT0a e NT0b). O NT1 diferiu apenas do NT0b. A terceira camada teve diferença de  $P_t$  entre NT0b e os demais tratamentos. Nas três camadas do solo a  $P_t$  diminuiu após trafegar três vezes no solo quando comparado ao NT0b.

A  $M_a$  foi significativa para os tratamentos apenas na primeira camada analisada. A quantidade de macroporos a zero passadas (NT0b) na primeira camada, de  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , é superior aos demais tratamentos com tráfego. A diferença ocorreu com o tráfego do blindado, diminuindo os macroporos até  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  após trafegar três vezes sobre o solo. O NT0a não diferiu de NT0b e NT1. Da mesma forma, NT1 não diferiu de NT0a e NT3, mas NT3 diferiu dos dois tratamentos sem tráfego. Os menores valores de  $M_a$  foram encontrados na segunda camada e aumentaram em profundidade.

A  $M_i$  teve diferença apenas na segunda camada. Os maiores valores de microporos estão na primeira camada (0,00 a 0,04 m). Na camada de 0,10-0,14 m o NT3 teve diferença em relação aos níveis sem tráfego (NT0a e NT0b). O NT1 teve diferença apenas com relação ao NT0b.

Os valores de  $K_{sat}$  só apresentaram diferença na terceira camada. O NT0b teve valor acima de  $80 \text{ mm h}^{-1}$  e diminuiu para um valor inferior a  $20 \text{ mm h}^{-1}$  para os demais níveis de tráfego em linha reta.



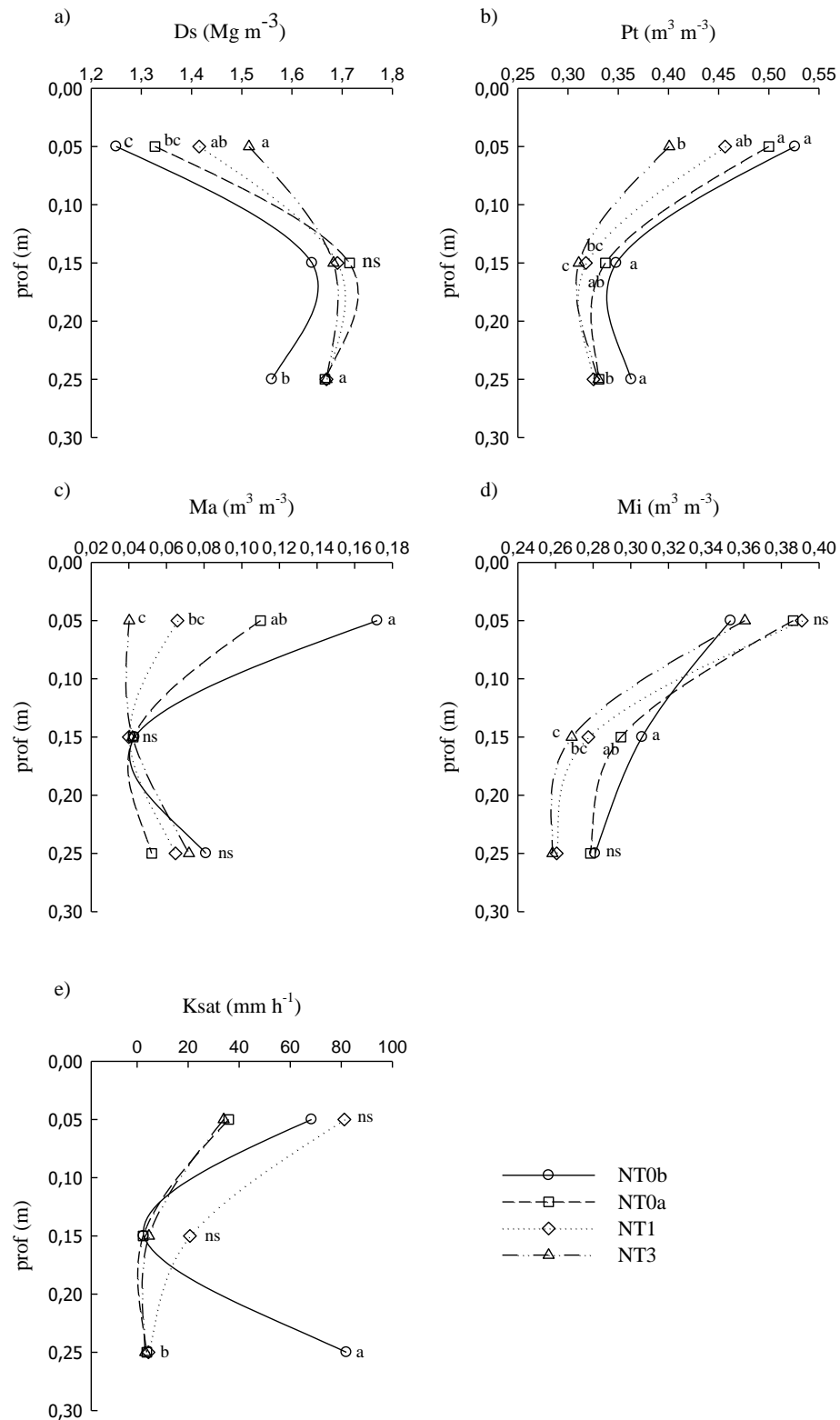


Figura 10 - Propriedades físico-hídricas do solo para os tratamentos do ensaio de tráfego em linha reta. Médias seguidas pela mesma letra indicam diferença significativa a 5% pelo teste Tukey para os níveis de tráfego; ns – diferença não significativa. Propriedades físico-hídricas analisadas: Ds – densidade do solo; Pt – porosidade total do solo; Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade; Ksat – Condutividade hidráulica do solo saturado; NT0b – nível de tráfego sem passada em linha reta de baixa densidade; NT0a – nível de tráfego sem passada em linha reta de alta densidade; NT1 – nível de tráfego com uma passada em linha reta; NT3 – nível de tráfego com três passadas em linha reta.

A resistência do solo à penetração diferiu significativamente em todas as camadas (Figura 11a), mesmo que não tenham ocorrido diferenças significativas de umidade volumétrica entre as camadas (Figura 11b).

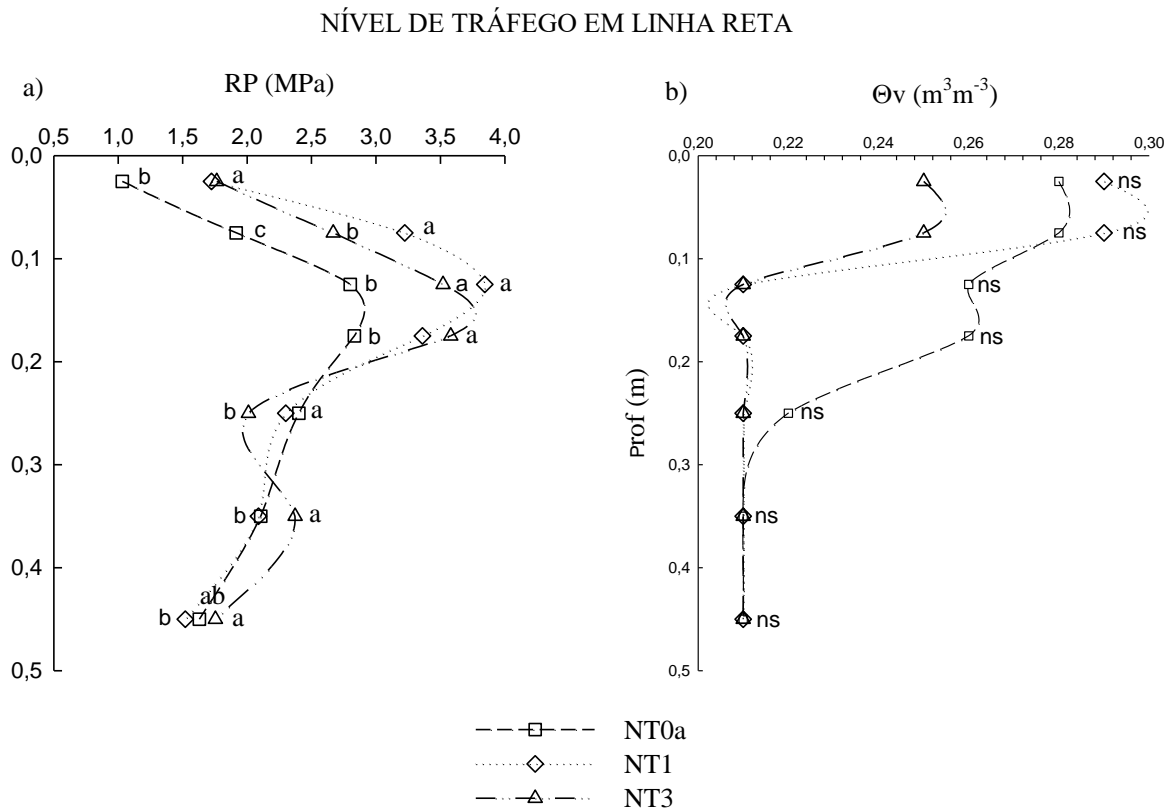


Figura 11 – Resistência à penetração (RP) (MPa) e umidade volumétrica ( $m^3 m^{-3}$ ) em área sem tráfego em linha reta de alta densidade (NT0a), submetida a uma passada (NT1) e à três passadas (NT3) do Leopard 1A5BR (ns = não significativo pelo teste de Tukey a 5%).

Fonte: Autor (2019).

A RP aumentou desde a superfície até atingir o valor máximo na camada de 0,10-0,20 m e depois diminuiu com o aumento da profundidade. De 0,00 a 0,20 m, os maiores RP foram para os níveis com tráfego (NT1 e NT2) em relação a NT0a. Na camada de 0,20 a 0,30 m o menor RP foi para NT3. Nas camadas de 0,30 a 0,50 m, a maior RP foi para o NT3. Nas camadas de 0,00-0,05 e de 0,10-0,20 m teve diferença entre o nível sem tráfego (NT0a) em relação aos níveis trafegados. Na camada de 0,05-0,10 m, diferenças significativas ocorreram entre os três níveis de tráfego, com maior RP no NT1 e menor no NT0a. Nas camadas de 0,20-0,40 m a diferença significativa ocorre entre NT1 e NT3, mas NT0a e NT1 não diferem entre si. Na

camada de 0,40-0,50 m o NT0a não difere de NT1 e NT3, mas os níveis de um e três tráfegos diferem entre si.

Na camada de 0,00-0,05 m, a RP iniciou em 1 MPa para NT0a e com o tráfego em linha reta os valores aumentam para 1,7 MPa. Nas camadas de 0,05-0,20 m, os valores de RP para NT0a foram maiores do que 2 MPa e atingiram, aproximadamente, 4 MPa aos 0,15 m de profundidade. Na camada de 0,20-0,50 m, a RP diminuiu, não sendo superior a 2,5 MPa, mas foi superior a 1,6 MPa.

As maiores RP ocorreram onde a umidade volumétrica foi menor. Os valores de umidade não tiveram diferença significativa entre os níveis de tráfego em todas as camadas, mesmo que em superfície o conteúdo de umidade volumétrica tenha sido maior para NT1, e em profundidade tenha se mantido constante.

### 5.2.2 Estudo 2: Tráfego em pivotamento

A Ds teve diferença significativa entre os tratamentos de pivotamento na primeira e segunda camada (0,00-0,04 e 0,10-0,14 m) (Figura 12a). Na primeira camada a Ds aumentou com a manobra de 1,25 para 1,45 Mg m<sup>-3</sup> após um pivotamento no solo. Apenas P0b e P1 diferiram entre si. Na camada de 0,10 a 0,14 m os valores de Ds foram acima de 1,60 g cm<sup>-3</sup>. A diferença significativa ocorreu apenas entre P0a e P1. Nessa camada os tratamentos P0b e P2 não diferiram entre si e nem dos demais tratamentos. Apenas os tratamentos P0a e P1 diferiram entre si, sendo o P0a o maior valor de densidade. Na camada de 0,20-0,24 m a variação dos dados de Ds não foi significativa.

Apenas a primeira camada do solo teve diferença de Pt (figura 12b), a qual diminuiu de 0,52 a 0,42 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> com as manobras de pivotamento. O P0b diferiu dos tratamentos com pivotamento, e P2 diferiu dos dois tratamentos sem manobra. As camadas não superficiais tiveram os valores de Pt menores.

A Ma foi significativa para os tratamentos da primeira e terceira camadas analisadas. A quantidade de macroporos a zero pivotamento (P0b) na primeira camada é superior aos demais tratamentos, com 0,17 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e diminuiu com o primeiro pivotamento para 0,06 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Apenas o P0b teve diferença em relação aos demais tratamentos. Na camada de 0,20-0,24 m apenas P0a diferiu das manobras de pivotamento.

A  $M_i$  ( $m^3 m^{-3}$ ) teve diferença apenas na camada superficial (0,00-0,04 m). As manobras de pivotamento diminuíram a  $M_i$  em relação ao P0a. Apenas P0a diferiu dos demais tratamentos.

A  $k_s$  teve diferença na camada superficial (0,00-0,04 m), diminuindo com as manobras. Apenas P0b teve diferença para os tratamentos de pivotamento. Ainda que nas outras duas camadas os valores de  $K_s$  tenham sido diferentes, não houve diferença estatística.

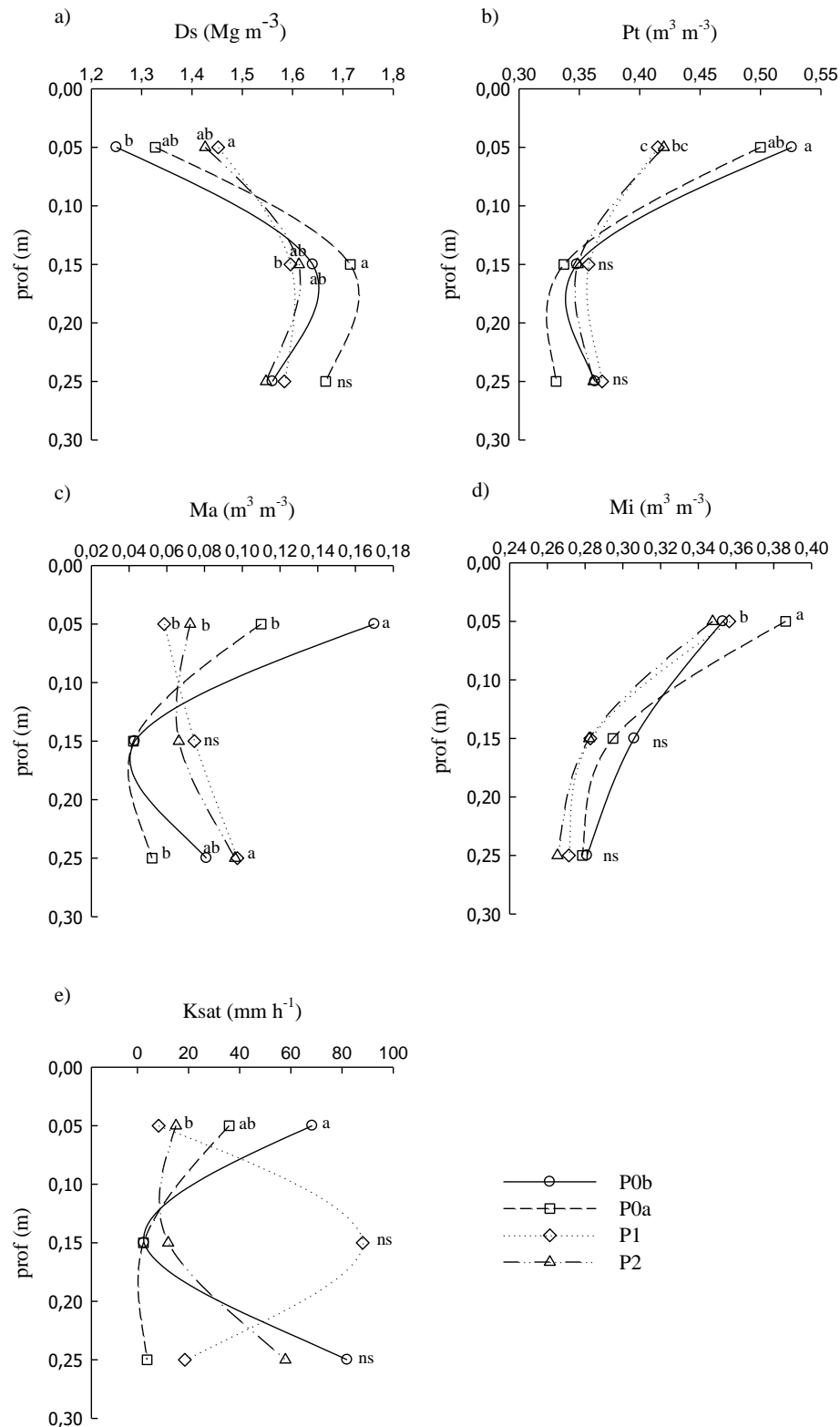


Figura 12 - Propriedades físico-hídricas do solo após tráfegos em pivô. Médias seguidas pela mesma letra indicam não haver diferença significativa a 5% pelo teste Tukey para os níveis de tráfego; ns – diferença não significativa. Propriedades físico-hídricas analisadas: Ds – densidade do solo; Pt – porosidade total do solo; Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade; Ksat – Condutividade hidráulica do solo saturado; P0b – tratamento para nenhuma manobra de pivô com densidade baixa; P0a – tratamento para nenhuma manobra de pivô com densidade alta; P1 – tratamento para um pivô completo; P2 – tratamento para dois pivôs completos.

A resistência do solo à penetração teve diferença significativa nas 7 camadas para as manobras de pivoteamento (Figura 13a), e não teve diferença em relação a umidade volumétrica (Figura 13b).

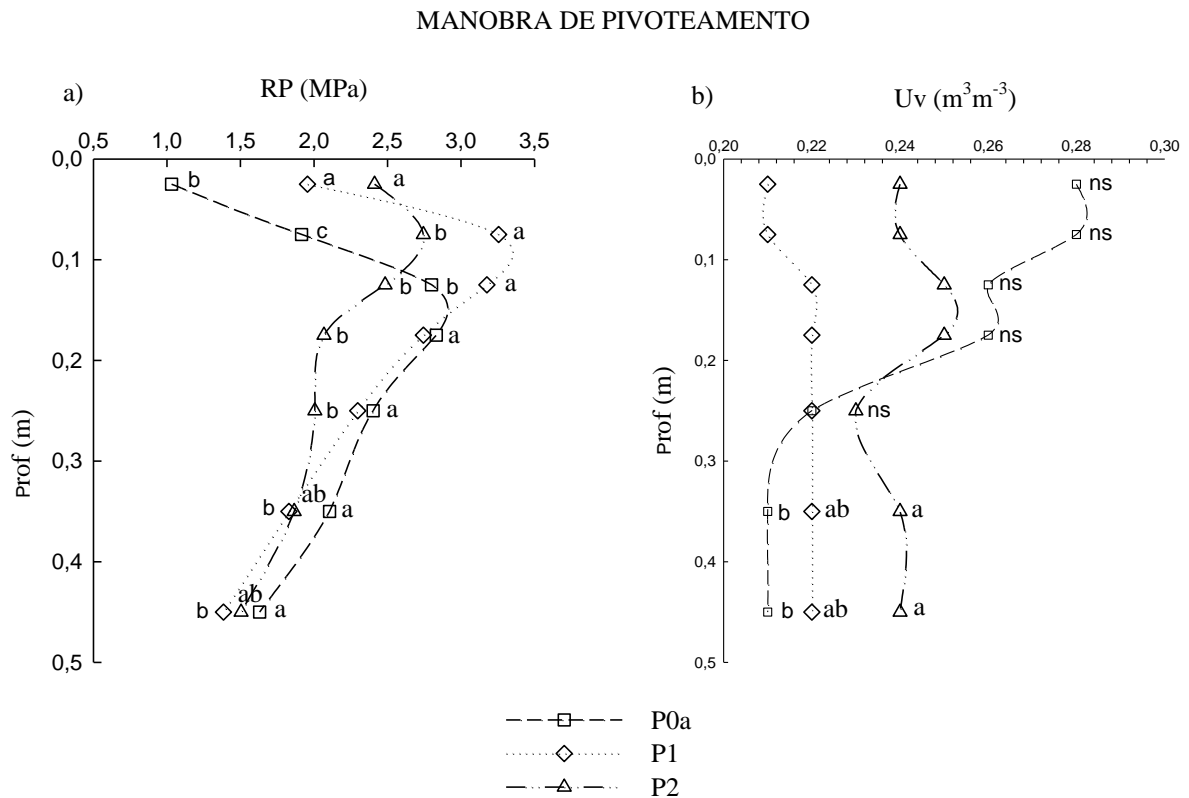


Figura 13 – Resistência à penetração (RP) (MPa) e umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em área sem manobra de pivoteamento de alta densidade (P0a), submetida a um pivoteamento (P1) e a dois pivoteamentos (P2) do Leopard 1A5 BR (ns = não significativo pelo teste de Tukey a 5%)

Fonte: Autor (2019).

A RP aumentou desde a superfície até atingir o valor máximo na camada de 0,05 a 0,15 m e depois diminuiu com o aumento da profundidade. De 0,00 a 0,10 m os maiores RP são de P1 e P2, e de 0,15 a 0,50 m os maiores valores de RP passam a ser do P0a. Todas as camadas tiveram diferença significativa de RP. Nas camadas de 0,00-0,05 apenas P0a teve diferença com as manobras de pivoteamento. Na camada de 0,05-0,10 m a diferença ocorreu entre todos os tratamentos. Na camada de 0,10-0,15 m P1 teve o maior RP e diferiu dos outros tratamentos. Nas camadas de 0,15-0,30 m a diferença significativa ocorre entre P3 e os outros tratamentos. Nas camadas de 0,30-0,50 m apenas o P1 diferiu de P0a.

Na camada superficial (0,00-0,05 m) os valores de RP iniciam em 1 MPa para NT0a e com o tráfego em linha reta os valores aumentam até 2,5 Mpa. Já nas camadas de 0,05-0,20 m os valores de RP para NT0a são maiores que 2 MPa e chegam até quase 3,5 MPa em 0,10 m.

Da camada de 0,20-0,50 m os valores diminuem, não sendo superiores a 2,5 MPa, mas ainda são maiores que 1,5 MPa.

Os maiores RP ocorreram onde a umidade volumétrica foi menor no P0a. A menor umidade em superfície proporcionou o aumento do RP para P1 e P2, e com o aumento da umidade em profundidade, a RP diminuiu. A umidade volumétrica para todos os tratamentos não teve diferença significativa, mesmo que de 0,00 a 0,20 m o conteúdo de umidade volumétrica do solo tenha sido maior para P0a, exceto nas camadas de 0,30-0,50 m, na qual o P0a diferiu de P2, e P1 não teve diferença significativa das demais manobras.

## 6 DISCUSSÕES

### 6.1 TRAFEGO EM LINHA RETA

O tráfego do veículo de combate proporcionou a compactação do solo na camada superficial, evidenciada pelo aumento da Ds e redução da Pt e da Ma, principalmente para o tráfego em linha reta com três passadas. O aumento da densidade do solo corrobora com os efeitos observados pelo tráfego de veículos blindados estudados por Althof; Thien (2005) e Braunack; Malafant (1988) em áreas militares. O aumento da Ds também foi observado por Beutler et al. (2009) e Streck et al. (2004), em áreas agrícolas, e por Martins et al. (2018) e Silva et al. (2008), em áreas florestais.

Apesar da alta umidade do solo, que potencializa a maior capacidade de transmissão da concentração das tensões geradas pelo estresse no solo em profundidade (LAMANDE; SCHJØNNING, 2011), os efeitos negativos em relação aos níveis de tráfego (NT1 e NT3) foram, majoritariamente, na camada superficial (0,00-0,004 m) e na camada mais profunda (0,20-0,24 m). A camada de 0,10-0,14 m não foi compactada com o aumento das passadas (Figura 10), o que demonstra um estado pré-compactado do solo, também evidenciado pela estrutura laminar/maciça observada na descrição morfológica do perfil de solo representativo da área de estudo.

A ausência de diferenças significativas para a maioria das propriedades nas áreas sem tráfego em comparação à área submetida a uma passada do veículo (NT1) indica que há um estado de pré-compactação da área, devido ao tráfego pré-existente comprovado pelo histórico da área. Todavia, para o tratamento de três passadas (NT3), houve aumento da compactação em relação aos níveis sem tráfego, com o aumento da densidade, redução da porosidade total e

macroporosidade na camada superficial, indicando que trafegar três vezes sobre o solo, promove a sua compactação adicional.

No entanto, trafegar uma ou três vezes sobre o solo não aumentou a compactação, de modo que, com apenas um tráfego, as propriedades físico-hídricas do solo que tiveram diferença (figura 10), foram afetadas de forma negativa quando houve a aplicação da carga do veículo blindado sobre o solo de baixa densidade. O maior grau de deformação no solo após o primeiro tráfego, corrobora com os estudos realizados por Ayers (1994); Prosser et al. (2000).

A massa do Leopard 1 A5 BR é de aproximadamente 42 toneladas, porém a pressão estática que ele aplica ao solo é de apenas 87 kPa. Quando aconteceu o tráfego, o solo estava suscetível à compactação por cargas dessa magnitude apenas na camada superficial (Figura 9), a camada mais suscetível à compactação, por estar com  $D_s$  baixa (1,2 a 1,5 Mg m<sup>-3</sup>) e  $\theta$  alta (0,33 a 0,39 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). No momento do tráfego, as combinações de  $D_s$  com  $\theta$  aplicadas na equação (1) resultam  $\sigma_p$  entre 60 e 92 kPa, o que indica que, somente na camada de 0,00-0,04 m, o solo sofreria compactação adicional se fosse submetida à carga de 87 kPa.

Nas outras camadas, o solo teve condições mais restritiva à compactação devido às maiores  $D_s$ . As maiores  $D_s$  nas camadas subsuperficiais são comuns em áreas trafegadas (PROSSER et al., 2000; RETTA et al., 2013; LANZANOVA et al., 2010) devido aos ciclos de umedecimento e secagem e à atividade biológica serem menos intensos do que na superfície, onde são mais eficientes para promover descompactação (WEBB, 2002; REINERT et al., 2008).

Resíduos na superfície do solo amorteceram o efeito de pressões aplicadas por equipamentos ou veículos (PALAZZO et al., 2005; BRAIDA et al., 2011). A vegetação presente no momento do tráfego, com massa seca da parte aérea entre 7,8 e 10,6 Mg ha<sup>-1</sup>, possivelmente amorteceu parte da pressão aplicada na superfície do solo pelo veículo blindado quando trafegando apenas uma vez, mas não teve efeito quando a intensidade de tráfego foi maior (NT3).

O aumento na compactação do solo proporcionado pelo tráfego de uma passada em linha reta também foi evidenciado pela RP. A RP indicou que o tráfego do blindado causa efeitos negativos no solo até 0,50 m de profundidade. O aumento da RP com o tráfego até os 0,20 m de profundidade demonstrou que a maior expressão do aumento da RP foi após trafegar uma vez em linha reta. Em maior profundidade, a maior RP foi após trafegar três vezes sobre o solo. Todavia, o maior incremento na RP ocorreu na camada superficial e foi menos pronunciado nas



camadas mais profundas, possivelmente, devido à menor densidade em superfície (REINERT et al., 2008), o que também foi observado por Valicheski et al. (2012).

## 6.2 TRÁFEGO EM PIVOTAMENTO

O maior efeito da manobra de pivotamento ocorreu na camada superficial. A manobra com apenas 1 pivotamento imprimiu efeito na Ds, Pt, Ma e Ks quando comparado ao sem tráfego de baixa densidade, entretanto, tais efeitos não ocorreram quando comparados ao sem tráfego de alta densidade, da mesma forma que não foi percebido efeito cumulativo com dois pivotamentos, assim como verificado por Braunack (1986) e Prosser et al. (2000).

A ausência de efeito das manobras de pivotamento na camada de 0,10-0,14m indicam uma condição de pré-compactação prévia da área. Essa condição de maior adensamento foi verificada na avaliação morfológica do solo no campo (tabela 1) e na maior resistência a cargas estáticas (figura 9), com  $\sigma_p$  de 60 e 92 kPa. Apesar da manobra de pivotamento imprimir uma carga dinâmica superior aos 87 kPa previstos, devido aos efeitos da vibração, do cisalhamento do solo e do aumento da força de atrito durante a rotação do blindado (AYERS, 1994; NIE et al., 2001; LIU et al., 2010; ALAKUKKU, 2012), não foi suficiente para promover a compactação das camadas subsuperficiais.

Os dados de Ks apresentaram uma variação de 15 a 80 mm h<sup>-1</sup> e, mesmo assim, sem diferença estatística entre os tratamentos nas camadas de 0,10-0,14 e 0,20-0,24 m, o que indica uma alta variabilidade dessa variável. A alta Ks média nessas camadas parece estar associada a variabilidade associada ao histórico de uso dos solos. Cabe também ressaltar que nem sempre solos com maior macroporosidade apresentam valores altos de Ks, esse comportamento, possivelmente, está relacionado a alteração da estrutura, continuidade e conectividade dos poros do solo em virtude à degradação pelo tráfego da área (RIZZARDI et al., 2014).

As manobras de pivotamento aumentam a RP apenas até 0,15 m, sendo a maior expressão sobretudo para o P1. Apenas na camada superficial (0,00-0,05 m) pivotar 2 vezes sobre o solo tem maior valor de RP. Apenas uma manobra de pivotamento sobre o solo já aumenta a RP até índices críticos ao crescimento de raízes (> 2 Mpa) conforme Silva et al. (2000a) e Reinert et al. (2008). Contudo, pôde-se observar que a vegetação da área se recuperou plenamente em até 4 meses após a intervenção.

O que se pode observar também, que as manobras de pivotamento acarretam no aumento da resistência do solo mais em superfície e que trafegar em linha reta três vezes aumenta a resistência do solo até as camadas mais profundas.

### 6.3 IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS MILITARES NO CISM

A morfologia do Argissolo Vermelho-Amarelo da área de estudo, condicionada pela textura franco arenosa nos horizontes A e E, com transição abrupta para um horizonte Bt franco argiloso (Tabela 2, Figura 8), favorece a ocorrência de processo erosivos superficiais e subsuperficiais (PEDRON et al., 2012). A presença de camada compactada na profundidade de 0,10-0,15 m evidenciada pela estrutura laminar/maciça, maior  $D_s$  e menor porosidade, provocada pelo tráfego de veículos blindados ao longo do tempo, reduz as taxas de infiltração de água, afetando também a  $K_s$  (figuras 10 e 12), aumentando as chances de escoamento superficial e erosão hídrica (SOLGI et al., 2014).

As vegetações nativas encontradas na área de estudo são resistentes aos danos ocasionados pelo tráfego do veículo blindado Leopard 1A5BR. A cobertura vegetal danificada durante o ensaio apresentou plena recuperação após 4 meses, demonstrando a sua resiliência. Considerando que a  $D_s$  na área do pivotamento ficou acima de limites restritivos para o crescimento de plantas ( $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ , sugerido por USDA, 1996;  $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ , sugerido por Reichert et al., 2003), ela não se mostrou um indicador de restrição adequado. A  $M_a$  menor que  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , valor considerado crítico (REICHERT et al., 2003), em todas as camadas avaliadas, após tráfego (Figuras 12 e 14) também não foi um bom indicador. Contudo, apesar da vegetação nativa ter se mostrado resistente, a resiliência das funções do solo no ambiente pode estar sendo comprometida pelo tráfego constante de veículo militares.

## 7 CONCLUSÕES

O tráfego da viatura de combate Leopard 1A5BR compactou o Argissolo Vermelho-Amarelo do campo de instrução militar de Santa Maria quando o tráfego ocorreu em linha reta e na manobra de pivotamento.

As alterações nas propriedades físicas se concentraram na camada superficial (0,00-0,04 m) e a maior expressão foi após o primeiro tráfego em linha reta e pivotamento. Para o estudo

com o tráfego em linha reta houve a maior compactação em profundidade, chegando até 0,45 m, como observado pela resistência a penetração, já a manobra de pivotamento teve suas alterações concentradas na camada superficial (0,00-0,15 m).

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os treinamentos com veículos de combate são frequentes e intensos no CISM, o que resulta na compactação do solo. Após o experimento, principalmente com a manobra de pivotamento da viatura blindada Leopard 1A5BR, foi observada a retirada da cobertura vegetal, deixando uma grande parte do solo descoberto. A cobertura vegetal absorve parte da pressão aplicada e protege o solo da degradação, a sua retirada pelas manobras dos veículos pode acarretar na intensificação da degradação física do solo, com o aumento da densidade e resistência mecânica à penetração, redução da macroporosidade e da taxa de infiltração de água no solo, como observado por Lanza Nova et al. (2010) em um Argissolo Vermelho.

Como efeito danoso do tráfego de blindados de combate sobre o solo e a vegetação, tem-se a potencialização de processos erosivos, como reportados por Ayers (1994), Prosser et al. (2000) e Whitecotton et al. (2000). Embora não sejam observados processos erosivos intensos nos campos do CISM, nas estradas ocorrem intensa degradação. Nas estradas e bordas do campo ao longo das estradas, onde o tráfego é intenso e frequente, são encontrados processos erosivos do tipo sulcos e voçorocas, como abordado nos estudos de Sant'ana (2012) Pittelkow (2013), Fernandes (2015) e Corrêa (2015) no próprio CISM.

Ainda, o alto teor da fração areia, principalmente em superfície, e o baixo teor de argila (agente agregador do solo) condiciona o Argissolo Vermelho-Amarelo a uma estrutura naturalmente mais frágil aos processos erosivos (STRECK et al., 2018). Outro fator que naturalmente deixa esse solo vulnerável à erosão é o incremento abrupto de argila no horizonte Bt, esta mudança textural dificulta a infiltração no solo, aumentando a erosão hídrica do mesmo. Tendo-se uma pré-disposição à susceptibilidade natural à erosão do solo, esta área necessita de cuidados especiais, e, as atividades de treinamento com as viaturas blindadas acabam compactando o solo e degradando a vegetação, o que acelera os processos erosivos.

Deste modo, cuidados com o monitoramento da área são imprescindíveis para evitar a compactação adicional e a supressão da cobertura vegetal, por isso, sugerem-se as seguintes práticas no CISM:

- a. rotação de uso dos campos de treino;

- b. evitar o uso dos campos em dias chuvosos;
- c. evitar o tráfego intensivo de veículos blindados mais pesados no sentido da pendente (morro abaixo);
- d. direcionar o uso dos campos conforme a altura da vegetação, dando prioridade aos campos com vegetação mais volumosa (acima de 70 cm de altura e 10 Mg ha<sup>-1</sup> de biomassa seca);
- e. concentrar as manobras (principalmente pivotamentos) em áreas mais planas do terreno;
- f. realizar o plantio de espécies perenes e robustas (sistema radicular e aéreo);
- g. se a altura da vegetação for importante nos exercícios militares, destinar campos de menor declividade (planos-topos de coxilhas) para vegetação mais baixa e manter a vegetação acima de 70 cm de altura nos campos de maior declividade.
- h. realizar o terraceamento das áreas com declividade acima de 6%.
- i. realizar o monitoramento das propriedades físicas do solo nas diferentes glebas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 79p. Dissertação (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2008
- ALAKUKKU L. Sustainable Agriculture. The Baltic University Programme: Uppsala University; 2012. Chapter 28, Soil Compaction; p. 217-221.
- ALTHOFF, P. S.; THIEN, S. J. Impact of M1A1 main battle tank disturbance on soil quality, invertebrates, and vegetation characteristics. **Journal of Terramechanics**, v. 42, p. 159–176, 2005.
- ÁLVARES et al. Climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22:711-728, 2013. Doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ANDERSON et al. Assessing the impacts of military vehicle traffic on natural areas. Introduction to the special issue and review of the relevant military vehicle impact literature. **Journal of Terramechanics**, v. 42, p. 143–158, 2005.
- ANDERSON, A. B., P. D. AYERS, H. HOWARD, AND K. D. NEWLIN. 2007. Vehicle impacts on vegetation cover at Camp Atterbury, Indiana: Part 1. Initial impacts and vegetation recovery. **Proc. Indiana Acad. Sci.** 116(Dec.): 126-138.
- AYERS. P. D. Environmental damage from tracked vehicle operation. **Journal of Terramechanics**, v. 31, n. 3, p. 173-183, 1994.
- BARIK, K et al. Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. **Catena**. V. 120, p. 122-133, 2014.
- BEUTLER et al. 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. DOI: 10.4025/actasciagron.v31i2.7042
- BRAIDA et al. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. **Tópicos Ciência do Solo**, 7:221-278, 2011.
- BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 131-139, 2010
- BRAUNACK, M. V. Changes in physical properties of two dry soils during tracked vehicle passage. **Journal of Terramechanics**, v. 23, p. 141-151, 1986.
- BRAUNACK, M.V.; MALAFANT, K.W.J. The effect of dynamic impact and water potential on some surface soil properties. **Journal of Terramechanics**, v. 25, n. 2, p. 149-162, 1988.
- BRAUNACK, M.V.; WILLIAMS, B. G. The effect of initial soil water content and vegetative cover on surface soil disturbance by tracked vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 30, n. 4, p. 299-311. 1993

BUSSCHER, W.J., 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. ASAE* 3, 519–524, <http://dx.doi.org/IND90052220>.

CAMBI, M. et al. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. **Forest Ecology and Management**. V. 338, p. 124-138, 2015.

CARVALHO, L. A. et al. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Eng. Agrícola e Ambiental**. V. 15, p. 940-949, 2011.

CASAGRANDE, A. Determination of the preconsolidation load and its practical significance. *Proceedings of the International Conference on the Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge. p. 60-64. 1936.

CORRÊA, A. D. **Estudo da erodibilidade de uma unidade geotécnica no Campo de Instrução de Santa Maria como base para o seu planejamento ambiental**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 116 p. 2015.

CRUZ, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1105-1112, 2003.

DANIELSON RE, Sutherland PL. Porosity. In: Klute A (ed) *Methods of soil analysis*. I. Physical and Mineralogical Methods, 2nd edn. **American Society of Agronomy Madison**, 1986. pp 443-461.

DEMARAIS, S.; TAZIK, D.J.; GUERTIN, P. J.; JORGENSEN, E. E. Disturbance associated with military exercises. In: Lawrence, R. W. (Ed.) **Ecosystems of Disturbed ground**. Las Vegas: p. 385-396, 1999.

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, p. 175-182, 1996.

DIAS et al. 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**, v. 20, n.1, p. 25-32, 2012.

DREWRY, J.J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing- a review. **Australian Journal of Soil Research**. v.46. p.237- 256, 2008.

FERNANDES, L. P. **Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do Campo de Instrução de Santa Maria - RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 150 p. 2015.

FERREIRA, D. F. **Sisvar** - sistema de análise de variância para dados balanceados. Versão 5.7. Lavras: UFLA, 2018. 19 p.

FLORES, C. A.; ALBA, J. M. F. Zoneamento Edáfico de Culturas para o Município de Santa Maria – RS, Visando o Ordenamento Territorial. Pelotas: Embrapa, 2015. 165p.

FREDDI et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 627-636, 2007.

GOOGLE LLC. Google Earth Pro. Versão 7.3.2.5776 (64-bit). 2019.

GUBIANI et al. EXCEL ADD-IN TO MODEL THE SOIL COMPRESSION CURVE. **Engenharia Agrícola**, 37(3), 603-610, 2017  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162017000300603](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162017000300603)

GUBIANI, P. I.; PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M. Relationship of precompression stress with elasticity and plasticity indexes from uniaxial cyclic loading test. **Soil & Tillage Research**. V.180, p. 29-37, 2018.

HÅKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**., v. 35, p. 85-97, 1995.

HAYDOCK KP, SHAW NH. The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, v. 15, p. 663-670, 1975.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. An-Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. p. 746, 1981. ISBN 0-13-484394-0.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Jerusalém, v. 11, p. 53-71, 1988.

KANE, J. R. et al. Multipass coefficients for terrain impacts based on military vehicle type, size and dynamic operating properties. **Journal of Terramechanics**. V. 50, p. 175-183, 2013.

KHAN, S. R.; ABBASI, M. K.; HUSSAN, A. Effect of Induced Soil Compaction on Changes in Soil Properties and Wheat Productivity under Sandy Loam and Sandy Clay Loam Soils: A Greenhouse Experiment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. V.43, p. 2550–2563, 2012. DOI: 10.1080/00103624.2012.711877

KLUTE, A., 1986. Water Retention: Laboratory Methods, in: Klute, A. Methods of Soil Analysis. I. Physical and Mineralogical Methods. **American Society of Agronomy**, Madison, pp. 635–662.

LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. **Soil and Tillage Research**, v. 114, p. 71-77, 2011.

LANZANOVA et al. da. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1333-1342, Viçosa, Julio- Agosto 2010.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 44, p. 450-457, 1980.

LIU K, AYERS P, HOWARD H, ANDERSON A. Influence of soil and vehicle parameters on soil rut formation. **J Terramechanics**. 2010; 47:143-150.

MAGAGNOTTI, N., SPINELLI, R., GULDNER, O., ERLER, J., 2012. Site impact after motormanual and mechanised thinning in Mediterranean pine plantations. **Biosyst. Eng.** 113, 140–147

MARTINS et al. Soil compaction during harvest operations in five tropical soils with different textures under eucalyptus forests. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 1, p. 58-68. Jan-feb. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018421005217>

MCKERMAN, J. M.; **Effects of military training on Mixed-Grass Prairie at Shilo, Manitoba, Canada, and utility of remedial seeding measures**. Submetido para obtenção de mestre em Ciencia. 123 p., 1984.

NELSON, E.W., SOMMERS, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. **Agronomy Monograph 9**. ASA and SSSA, Madison, pp. 539–579.

NIE, Z. N.; WARD, G. N.; MICHAEL, A. T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on south – western Victoria. **Australian Journal Agricultural os Soil Research**, v. 52, p. 37-43, 2001.

PALAZZO AJ, JENSEN KB, WALDRON BL, CARY TJ. Effects of tank tracking on range grasses. **J Terramechanics**. 2005; 42:177-191. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.005>

PEDRON, F. A; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C. Solos do perímetro urbano de Santa Maria: características, classificação e potencial de uso. Santa Maria: **Orium**, 143 p. 2008.

PEDRON, F.A.; SAMUEL-ROSA A.; DALMOLIN, R.S.D. Variation in pedological characteristics and the taxonomic classification of Argissolos (Ultisols and Alfisols) derived from sedimentary rocks. **Bras J Cis Solo**. 2012; 36:1-9. Doi: 10.1590/S0100-06832012000100001

PENG et al. Mechanisms of soil vulnerability to compactation of homogenized and recompacted Ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p. 125-137, 2004.

PERKINS, D. B. et al. Soil hydraulic properties as ecological indicators in forested watersheds impacted by mechanized military training. **Ecological Indicators**. V.7, p. 589-597, 2007.

PITTELKOW, G. C. **Erosão em estrada de terra no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 115 p. 2013.



PROSE, D. V.; H. G. WILSHIRE. The lasting effects of tank maneuvers on desert soils and intershrub flora. *U.S. Geological Survey Open-File Report OF 00-512*, (<http://geology.usgs.gov/open-file>). 2000.

PROSSER, C. W.; SEDIVÉC, K. K.; BARKER, W. T. Tracked vehicle effects on vegetation and soil characteristics. **Journal of Range Management**, v. 53, n. 6, nov. 2000.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ci. Amb.**, 27:29-48, 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 Ci. Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REINERT et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

RETTA, A. et al. Evaluation of Bulk Density and Vegetation as Affected by Military Vehicle traffic at Fort Riley, Kansas. **American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2151-0032**. V. 52, n. 2, p. 653-665, 2013.

RICHART et al. **Compactação do solo: causas e efeitos**. In: Seminário de Ciências Agrárias, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul/set. 2005.

RIZZARDI et al. Atributos físicos e fluxo de água em solos da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim – RS. **REMOA** – v. 13., n. 5, p. 3690-3701, 2014. Edição Especial LPMA/UFSM.

SANT'ANA, K. D. A. **Diagnóstico ambiental do meio físico do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 125 p. 2012.

SANTOS, R. D. dos.; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7 ed. rev. ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 101 p. 2015.

SANTOS, H. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. rev. ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 353 p. 2018.

SILVA, A. J. N. da.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 921-930, 2006.

SILVA, S. et al. Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 921-932, 2008.

SILVA, V.R., Reinert, D.J., Reichert, J.M. Soil strength as affected by combine wheel traffic and two soil tillage systems. **Ciencia Rural**. 30, 795–801, 2000<sup>a</sup>

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000b.

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, p. 9-15, 2002.

SOLGI, A.; NAJAFI, A.; SADEGHI, S.H. Effects of traffic frequency and skid trail slope on surface runoff and sediment yield. **J For Eng**. 2014; 25(2):171-178. <https://doi.org/10.1080/14942119.2014.955699>

STRECK, C. A. et al. 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.

STRECK, E. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3 ed., rev. ampl. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 252 p. 2018.

TEIXEIRA et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA, 573 p. 2017.

THUROW, T. L.; WARREN, S. D.; CARLSON, D. H. Tracked vehicle traffic effects on the hydrologic characteristics of Central Texas Rangeland. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 6, p. 1645-1650, nov./dec. 1993.

USDA. Soil Quality Resource Concerns: Compaction. Washington (DC): National Soil Survey Center; 1996

VALICHESKI et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

VAN DONK et al. Wind erosion from military training lands in the Mojave Desert, California, U.S.A. **Journal of Arid Environments**. v. 54, p. 687-703. 2003. Doi: 10.1006/jare.2002.1085

VENNIK, K. et al. Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types. **Soil & Tillage Research**. V. 189, p. 120-127, 2019.

WEBB, R. H. Recovery of Severely Compacted Soils in the Mojave Desert, California, USA, **Arid Land Research and Management**, v. 16, n. 3, p. 291-305, 2002. DOI: 10.1080/153249802760284829.

WHITECOTTON et al. Impacto f Foot Traffic from Military Training on Soil and Vegetation Properties. **Environmental Management**. v. 26, n. 6, p. 697-706, 2000. DOI: 10.1007/s002670010126