

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

Beatriz Wardzinski Barbosa

**PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO APÓS TRÁFEGO DA VIATURA
BLINDADA DE TRANSPORTE MILITAR M113 BR NO CAMPO DE
INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA, RS**

Santa Maria, RS
2019

Beatriz Wardzinski Barbosa

**PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO APÓS TRÁFEGO DA VIATURA BLINDADA
DE TRANSPORTE MILITAR M113 BR NO CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA
MARIA, RS**

Dissertação apresentada ao Curso 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

Barbosa, Beatriz Wardzinski
Propriedades físicas do solo após tráfego da Viatura
Blindada de Transporte Militar M113 BR no Campo de
Instrução de Santa Maria, RS / Beatriz Wardzinski
Barbosa.- 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. Compactação do solo 2. Trafegabilidade 3. Veículos
off-road 4. Densidade do solo I. Pedron, Fabrício de
Araújo II. Título.

Beatriz Wardzinski Barbosa

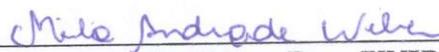
**PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO APÓS TRÁFEGO DA VIATURA BLINDADA
DE TRANSPORTE MILITAR M113BR NO CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA
MARIA, RS**

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

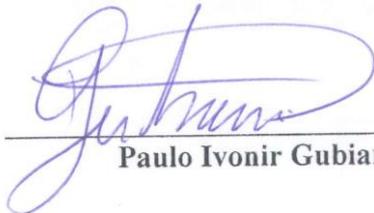
Aprovado em 01 de agosto 2019:



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



Mirla Andrade Weber, Dra. (UNIPAMPA)



Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por sempre ter sido o meu exemplo de ética, gentileza e honestidade. Você é a mulher mais forte e guerreira que existe. Eu tenho orgulho de te chamar de mãe.

À minha irmã, meu cunhado e à minha amada sobrinha por trazerem felicidade e amor aos meus dias de férias em Vinhedo. Por me levarem, buscarem e se perderem no aeroporto, todas as vezes. Pelos passeios deliciosos no shopping, nos bosques, nos restaurantes (apesar disso, o que eu amo mesmo é ficar em casa aprontando e tirando soneca com a Valen).

À Kellyn, Monique, Phillipp e Tom, por serem minha família adotiva, meu porto-seguro, me darem ânimo, conselhos, amor, paz de espírito e sensação de lar. Vocês são os que mantêm minha mente sã e meu corpo com forças para enfrentar cada dia.

À Universidade Federal de Santa Maria pelo ensino superior gratuito e de qualidade. Sempre defenderei a educação pública!

À população brasileira por me conceder a bolsa estudantil, por meio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sem a qual eu não conseguiria ter conquistado o título de Mestra.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela contribuição à minha formação profissional e por terem me recebido com tanta dedicação.

Ao meu orientador Fabrício de Araújo Pedron, pelas piadas nos dias de coletas e nas reuniões, que deixavam tudo mais leve – além de toda ajuda em campo, no laboratório e na escrita. Graças a você, o Mestrado não foi uma etapa tão difícil como eu tanto temia.

Ao Paulo Ivonir Gubiani por aceitar fazer parte da banca de defesa, pelos sábios apontamentos e por toda a paciência na hora de ensinar e explicar.

À Miriam Fernanda Rodrigues, por ter sido uma co-orientadora não oficial. Sem a sua imensa ajuda, eu teria tido mil vezes mais trabalho ao escrever a dissertação. Obrigada por cada tabela, gráfico, correção, estatística, interpretação, dúvida sanada, resposta no WhatsApp, dedicação e conhecimento.

À Cândida Regina Müller pelos dois anos que trabalhamos juntas, pelas discussões sobre Volpato, os cafés com cuca, as risadas, por todas as vezes que você falou com os professores, porque eu não queria falar. Literalmente, o nosso mestrado foi um trabalho em dupla!

À equipe do Centro de Instrução de Blindados General Walter Pires (CI Bld), Coronel Carlos Alexandre Geovanini dos Santos, Major Cristiano Dorneles de Souza, Major Fernando Andrade de Sena, Capitão Marcelo Radé, Coronel Rodolfo Augusto Crass, 1º Sargento

Elisandro Rodrigues Sauzem e à equipe do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM) pelo suporte oferecido à realização do experimento.

Ao Ricardo Bergamo Schenato pelas preciosas contribuições estatísticas.

À Mirla Andrade Weber por ter aceitado fazer parte da banca de defesa e pela contribuição dada aos meus estudos e vida profissional, para que hoje eu pudesse estar onde estou.

Aos colegas de laboratório pela imensa ajuda nas análises de laboratório, risos e conversas: Camila Maia, Nicolas Augusto Rosin, Andrei Dobner, Guilherme Reis, Leonardo Granzotto Zottele e Albeneir Oliveira

Ao técnico e colegas do Laboratório de Física: Flávio Fontinelli, Micael Stolben, Alan Batistão, Douglas Scheid. Devo metade deste trabalho a vocês!

Aos professores da Ciência do Solo, por todos os ensinamentos dados nas disciplinas e fora delas: Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Rodrigo Jacques, Jean Minela, Celso Aita, Sandro Giacomini, Zaida Antonioli e José Miguel Reichert.

Aos colegas da pós-graduação, pela ajuda e dicas preciosas: Luís Antônio Coutrim dos Santos, Letiéri Freitas, Jânio Barbosa, Daniely Vaz, Jean Bueno, Taciara Zborowski Horst, Jéssica Costa, Franciele de Bastos e Heitor Bazzo.

Ao secretário do PPGCS Heverton Heinz, pela simpatia, atenção e cuidado ao tratar dos nossos problemas acadêmicos.

À minha psicóloga Vaneza Gelatti, por me motivar e me fazer sentir que tudo está bem.

À minha gata Athena, por ser minha companheirinha, pelos aprontamentos que me tiram do sério e não deixar eu sentir que estou sozinha.

E, por fim, Ele Não.

*“Imagine there's no countries
It isn't hard to do
Nothing to kill or die for”*

(John Lennon)

RESUMO

PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO APÓS TRÁFEGO DA VIATURA BLINDADA DE TRANSPORTE MILITAR M113 BR NO CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA, RS

AUTORA: Beatriz Wardzinski Barbosa
ORIENTADOR: Fabrício de Araújo Pedron

As propriedades físicas do solo podem ser alteradas após o tráfego de veículos, especialmente em condições de alta umidade. A persistência e intensidade dessas mudanças dependem principalmente de fatores como textura, umidade, conteúdo de matéria orgânica e histórico de cargas aplicadas. O Campo de Instrução de Santa Maria (CISM), onde o experimento foi realizado, é atualmente o campo de instrução para veículos blindados com a maior intensidade de uso no Brasil, sendo o M113 BR o veículo blindado mais utilizado. O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos de diferentes modos de tráfego do M113 BR nas propriedades físicas e mecânicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo. O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, avaliando independentemente o efeito do tráfego em linha reta e pivotamento em três camadas do solo (0,00-0,04, 0,10-0,14 e 0,20-0,24 m). Para o tráfego em linha reta, foram avaliadas as intensidades de tráfego (IT) com uma (IT₁), duas (IT₂) e cinco (IT₅) passadas no mesmo rastro. Para o tráfego em pivotamento, foram avaliadas IT com um (IT_{1P}) e dois (IT_{2P}) pivotamentos. Ambos os estudos tiveram dois tratamentos sem tráfego (ST). Foram feitas análises da densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), condutividade hidráulica do solo saturado (Ks), resistência do solo à penetração (RP), capacidade de suporte de carga, pressão de preconsolidação, umidade gravimétrica, distribuição granulométrica, carbono orgânico total, descrição morfológica do perfil do solo, composição botânica geral e biomassa seca da vegetação. No tráfego em linha reta, prevaleceram os casos sem diferenças significativas na PT, Ma, Mi e Ks. O PT mais alto, o menor Ds e o maior Mi foram observados na camada de 0,10-0,14 m. No estudo em pivotamento, um tráfego foi suficiente para aumentar a Ds e diminuir PT, Ma, Mi e Ks na camada de 0,00-0,04 e, para esta mesma camada, o aumento de um para dois pivotamentos teve diferença significativa apenas na Mi. Ambos os tipos de intensidade de tráfego não afetaram a RP em nenhuma camada. O Argissolo suportou as cargas resultantes do tráfego do M113 BR quando este ocorreu em linha reta. O tráfego em pivotamento promoveu compactação adicional na camada superficial do solo, aumentando sua degradação. A pressão de preconsolidação não foi um parâmetro adequado para verificar a capacidade do solo de suportar as cargas aplicadas pelo tráfego em pivotamento

Palavras-chave: Compactação do solo, trafegabilidade, veículos *off-road*, densidade do solo.

ABSTRACT

PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL AFTER M113 BR ARMORED MILITARY CARRIER'S TRAFFIC AT SANTA MARIA INSTRUCTION FIELD, RS

AUTHOR: Beatriz Wardzinski Barbosa
ADVISOR: Fabrício de Araújo Pedron

The physical properties of the soil can be changed after vehicle traffic, especially in high humidity conditions. The persistence and intensity of soil changes promoted by vehicle traffic are mainly dependent on factors such as texture, moisture, organic matter content and its stress history. The Santa Maria Instruction Field (CISM), where the experiment was carried out, is currently the instruction field for armored vehicles in Brazil with the highest use intensity, with the M113 BR being the most used armored vehicle. The objective of this work was to verify the effects of different traffic configurations of the M113 BR on the physical mechanical properties of an Abruptic Alisol. The study was conducted in a completely randomized design, independently evaluating the effect of straight and pivoting traffic in three soil layers (0.00-0.04, 0.10-0.14 and 0.20-0.24 m). For the straight-line traffic, were evaluated traffic intensities (TI) with one (TI₁), two (TI₂) and five (TI₅) passes on the same trail. For the pivoting traffic, were evaluated TI with one (TI_{1P}) and two (TI_{2P}) pivots. Both studies had two non-traffic treatments (NT). It were made the analysis of the soil bulk density (Bd), total porosity (TP), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), saturated soil hydraulic conductivity (Ks), soil penetration resistance (PR), soil bearing capacity, preconsolidation pressure, gravimetric water content, particle size distribution, total organic carbon, morphological description, general botanical composition and dry mass of the vegetation. In the straight-line traffic, prevailed the cases with no significant differences in TP, Ma, Mi and Ks. The highest TP, smallest Bd and largest Mi were observed in the 0.10-0.14 m layer. In the pivoting traffic, one pass was sufficient to increase Bd and decrease TP, Ma, Mi and Ks in the 0.00-0.04 m layer and the increase from one to two pivotings had significant difference only in Mi in this same layer. Both types of traffic intensity did not affect the PR in any layer. The Abruptic Alisol supports the loads resulting from M113 BR vehicle traffic when it occurs in a straight line. The pivoting maneuver promoted additional compaction to the topsoil, increasing its degradation. The preconsolidation pressure was not an adequate parameter to verify the soil's ability to support the loads applied by pivoting traffic.

Keywords: Soil compaction, off-road, trafficability, bulk density.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	ARGISSOLOS.....	13
2.2	COMPACTAÇÃO DO SOLO	14
2.3	EFEITOS DE VEÍCULOS COM ESTEIRAS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....	17
2.4	CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA	21
2.5	VIATURA BLINDADA DE TRANSPORTE DE PESSOAL M113 BR.....	22
3.	OBJETIVO	23
4.	MATERIAL E MÉTODOS	23
5.	RESULTADOS	32
5.1	DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO E CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL.....	32
5.2	TRÁFEGO DO M113 BR EM LINHA RETA	34
5.3	TRÁFEGO DO M113 BR EM PIVOTAMENTO	36
6.	DISCUSSÃO	38
6.1	TRÁFEGO DO M113 BR EM LINHA RETA	38
6.2	TRÁFEGO DO M113 BR EM PIVOTAMENTO	39
6.3	POTENCIAIS CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS DECORRENTES DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS MILITARES	41
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO ARGISSOLO CISM	48

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do solo é caracterizada pela capacidade de sustento da comunidade biológica, manutenção da qualidade ambiental e promoção do crescimento saudável de plantas e animais – incluindo os seres humanos. Os parâmetros físicos, em conjunto com os biológicos e químicos, são importantes para sustentar essas funções e servem como indicadores da qualidade do solo (REICHERT et al., 2007).

O tráfego de veículos tem um impacto potencialmente negativo na qualidade do solo, pois produz tensões em superfície e em profundidade, promovendo modificações em suas propriedades físicas. Caso a tensão supere a resistência interna do solo, poderá ocorrer, como consequência das alterações físicas, a sua compactação (DIAS JUNIOR, 2000; REICHERT et al., 2007). A persistência e intensidade das mudanças no solo promovidas pelo tráfego de veículos são dependentes, principalmente, de fatores como textura, umidade, conteúdo de matéria orgânica e seu histórico de tensão (ALTHOFF & THIEN, 2005; NAWAZ et al., 2013).

As mudanças que podem ocorrer nas propriedades físicas do solo após o tráfego de veículos, principalmente em condições de elevada umidade, incluem: aumento da densidade do solo, diminuição da porosidade total (SOLGI et al., 2014; KELLER, 2019), diminuição da capacidade de infiltração e aumento da resistência mecânica do solo à penetração (KELLER, 2019). Também é comum ocorrer a remoção da cobertura vegetal (ALTHOFF & THIEN, 2005), aprofundamento do solo nos rastros dos veículos (VENNIK et al., 2019) e processos erosivos no solo (SOLGI et al., 2014).

No Brasil, no âmbito agrícola, florestal e zootécnico, os estudos sobre deformação no solo pelo efeito do tráfego de máquinas são abundantes, podendo ser citado como exemplo estudos com tratores agrícolas: a pesquisa realizada por Brandt (2005) em solo utilizado para o cultivo de soja no bioma Pampa, mostrou que após dois tráfegos houve redução significativa na macroporosidade da camada superficial do solo (0,00-0,05 m) e na porosidade de 0,10-0,20 m, além da densidade também ter aumentado nesta última, concluindo que o aumento da densidade já ocorre principalmente no primeiro ou segundo tráfego. Já Rosa (2009), em um experimento realizado na mesma região geográfica, obteve o resultado de que a camada do solo mais afetada pela carga do trator agrícola concentrou-se de 0,05-0,15 m, após 4 e 8 tráfegos.

Entretanto, estudos sobre os impactos dos tráfegos de veículos blindados militares são inexistentes no país. Mundialmente, estes impactos começaram a ser debatidos no final dos anos 70 e começo dos anos 80, em estudos que incluíam os efeitos dos tráfegos dos veículos no solo, na vegetação e na fauna edáfica das instalações militares (ANDERSON et al., 2005). Os

estudos comprovam que áreas com tráfego de veículos militares em intensidade alta, moderada e em locais remediados, a densidade do solo foi similar e significativamente maior do que nas áreas com tráfego leve (GARTEN JR et al., 2003). Em locais com solos arenosos, a compactação do solo pode durar por décadas após o tráfego intenso de veículos *off-road* (IVERSON et al., 1981).

Alguns exemplos de trabalhos sobre o impacto do tráfego de veículos blindados, incluem solos como: Inseptisol (Estados Unidos) (THUROW et al., 1993), Mollisol (Estados Unidos) (PROSSER et al., 2000), de textura franco siltosa e franco argilo siltosa (Estados Unidos) (ALTHOFF & THIEN, 2005), Haplustalf, Entisol (Austrália) (BRAUNACK, 1986) e de textura franco argilo arenosa (Austrália) (AYERS, 1994). Porém, cada tipo de solo reage diferentemente a uma mesma pressão aplicada (NAWAZ et al., 2013) e ainda não foi realizada nenhuma pesquisa sobre o impacto do tráfego de veículos militares nas condições climáticas e nos solos do Brasil.

Anderson et al. (2005) cita que enquanto algumas áreas são intensamente estudadas, como o Sudoeste norte-americano, muitos ecótipos ainda não foram explorados em pesquisas sobre o impacto de veículos militares, sendo esta uma lacuna do conhecimento. Apesar de se referir ao contexto norte-americano, essa premissa pode ser inserida no contexto brasileiro. Uma cobertura espacial mais completa de estudos de impacto ambiental causado pelo tráfego de viaturas blindadas é necessária para, por exemplo, poder avaliar efetivamente as alternativas de realocação de missões em nível nacional (ANDERSON et al., 2005).

O Campo de Instrução de Santa Maria (CISM) pertence ao Exército Brasileiro e tem uma área de 5.867 hectares. Atualmente, é o campo de instrução de viaturas blindadas do Brasil com maior intensidade de uso, recebendo militares de todo o país e até mesmo de países estrangeiros. Diversas unidades militares de Santa Maria executam exercícios e cursos de uso de viaturas blindadas em quase todo o ano, com exceção dos meses de dezembro e janeiro. Por volta de 15 mil homens utilizam a área para exercícios de treinamento militares, direta ou indiretamente, juntamente com o uso de aproximadamente 140 blindados - incluindo o M113 BR e o Leopard 1A5 (SANT'ANA, 2012).

O VBTP (Viatura Blindada de Transporte de Pessoal) M113 BR (M113 A2 Mk1) é uma versão brasileira modernizada do M113, um dos veículos militares de esteira, blindado e anfíbio mais produzido e utilizado no mundo desde a década de 1960. As primeiras unidades foram adquiridas pelo Brasil na década de 1970 e o processo de modernização para a versão BR iniciou em 2011 (GRAY, 2014). O M113 BR apresenta 80% do seu contingente nacional alocado nas unidades militares de Santa Maria e é a viatura mais usada no CISM.

Até 2030 o CISM pretende se tornar o maior centro de instrução de infantaria blindada da América Latina. As demandas de uso intensificarão a utilização da área, potencializando os impactos ambientais. É importante frisar que o solo predominante da área do CISM é o Argissolo Vermelho-Amarelo, com textura franco arenosa nos horizontes superficiais e mudança textural abrupta. Essa característica confere fragilidade frente aos processos erosivos, já que a diferença na taxa de infiltração entre os horizontes pode levar à saturação por água dos horizontes superficiais, dando início ao escoamento superficial da água e levando à erosão em sulcos e, posteriormente, à formação de voçorocas (STRECK et al., 2018). Atualmente já são percebidos danos nas estradas, vegetação, solos e cursos d'água, devido à supressão da cobertura vegetal, compactação e erosão dos solos. Assim, a caracterização da magnitude dos impactos do tráfego de veículos blindados sobre as propriedades físicas do solo é importante para que, futuramente, possa-se realizar um planejamento do tráfego e um plano de manejo do solo e vegetação, visando a conservação da área de instrução militar.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ARGISSOLOS

Os Argissolos constituem 19,98% da superfície do país, dos quais 14,77% estão localizados na região Sul, onde o uso intensivo do solo é uma característica da região. Atualmente no estado do Rio Grande do Sul, grande parte da cobertura vegetal nativa de florestas e campos foi substituída pela exploração agropecuária e florestal. Essa classe de solo é naturalmente suscetível à erosão, entretanto, ainda respondem no estado por grande parte da produção de grãos. Dessa maneira, o cultivo intenso, aliado à mecanização agrícola, é responsável por altos índices de erosão do solo (MANZATTO et al., 2002).

Os Argissolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos que possuem textura arenosa nos horizontes superficiais (A e E), especialmente com mudança textural abrupta, podem apresentar diferenças nas taxas de infiltração entre os horizontes, pois a água infiltra rapidamente nos horizontes A e E e diminui no Bt, menos permeável. Como consequência, ocorre a saturação por água dos horizontes superficiais (o tempo para que isto ocorra depende da profundidade destes), dando início à erosão hídrica (STRECK et al., 2018).

A erosão tem como uma das consequências a redução da fertilidade do solo, pois os nutrientes podem ser perdidos por meio do escoamento superficial ou aderidos às partículas de solo, como o fósforo. Além disso, devido à sua baixa fertilidade natural, os Argissolos são

limitantes para o uso agrícola por causa de sua acidez e altos teores de alumínio (STRECK et al., 2018).

Quanto às suas características, os Argissolos são solos minerais que possuem um horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B. A transição entre os horizontes é usualmente clara, abrupta ou gradual. Tendem a ocorrerem em relevo suave ondulado a fortemente ondulado e a sua profundidade é bastante variável. Podem ser forte a imperfeitamente drenados e, geralmente, possuem cores avermelhadas ou amareladas (indicando ambientes de boa drenagem); cores brunadas ou acinzentadas ocorrem com menor frequência (indicando drenagem moderada ou imperfeita). A cor é acrescentada à nomenclatura do solo no segundo nível categórico, podendo ser Vermelho, Vermelho-Amarelo, Bruno-Acinzentado, Acinzentado ou Amarelo (SANTOS et al., 2013).

Os Argissolos podem ter acidez forte a moderada e saturação por bases alta ou baixa. A principal característica química (eutrófico, distrófico, alítico ou alumínico) é acrescentada à nomenclatura no terceiro nível categórico (SANTOS et al., 2013).

O horizonte A possui textura que varia de arenosa a argilosa, enquanto o horizonte Bt varia de textura média a muito argilosa. O incremento no teor de argila sempre ocorre do horizonte A ou E para o horizonte B. A principal característica física (arênico, espessarênico, abrupático, latossólico, úmbrico, plíntico ou típico) é incluída na nomenclatura no quarto nível categórico (SANTOS et al., 2013).

2.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Atualmente, a compactação dos solos é um grande problema em nível mundial, afetando cerca de 4% da área total de terras, o que corresponde a aproximadamente 680.000 km² de solo. Esse tipo de degradação afeta diretamente a produção agrícola, podendo diminuir em até 60% os rendimentos das culturas (DIAS, 2016). A longo prazo, os efeitos da compactação em subsuperfície (profundidade maior do que 0,30 m) são de difícil recuperação e podem permanecer por anos, décadas ou, em alguns casos, serem irreversíveis (ALAKUKKU, 2012). Assim, o princípio a ser aplicado deve ser sempre o de prevenção à compactação e não a sua posterior remediação (ALAKUKKU et al., 2003).

A compactação é o adensamento do solo pela aplicação de energia mecânica (HOLTZ & KOVACS, 1981), que pode ser interna, como o adensamento natural por ciclos de umedecimento e secagem, ou externa, causada por rolamento, vibração ou pressionamento. A

compactação é uma função de quatro variáveis: densidade do solo seco, conteúdo de água, tensão aplicada e tipo de solo (PROCTOR, 1933).

Um solo pode ser compactado instantaneamente por meio da aplicação de tensão ou ao longo do tempo, devido ao seu próprio peso e ao da água da chuva - como no caso dos solos coesivos, devido à sua baixa permeabilidade – e a sua compactabilidade pode ser medida por propriedades como densidade e porosidade.

As propriedades físicas do solo são afetadas em maior ou menor grau devido à compactação, principalmente o volume e o número de macroporos, assim como a distribuição de poros nos solos minerais - a continuidade, formato e morfologia do poro são alteradas. O aumento da densidade do solo ou diminuição da porosidade provoca o rearranjo das partículas e expulsão de gases e/ou fluídos dos espaços vazios (KALIAKIN, 2017), como consequência, o movimento de ar e água no solo são influenciados (FLORES et al., 2008).

Na América Latina as duas principais causas da compactação do solo são a produção animal e o tráfego de máquinas. O uso de máquinas, especialmente nos Pampas e Cerrado, causa a compactação superficial e condições estruturais pobres na camada superficial do solo, associado principalmente com a monocultura de soja e longos períodos de pousio (FAO & ITPS, 2015). Nos solos urbanos, a compactação geralmente é causada pela aplicação de tensão em curtos períodos, como pelo tráfego de veículos e pessoas. A compactação por tráfego de veículos pode ter efeitos a curto prazo (um a cinco anos) ou à longo prazo (mais de cinco anos) e normalmente se manifesta nos primeiros 0,30 m de profundidade (ALAKUKKU, 2012).

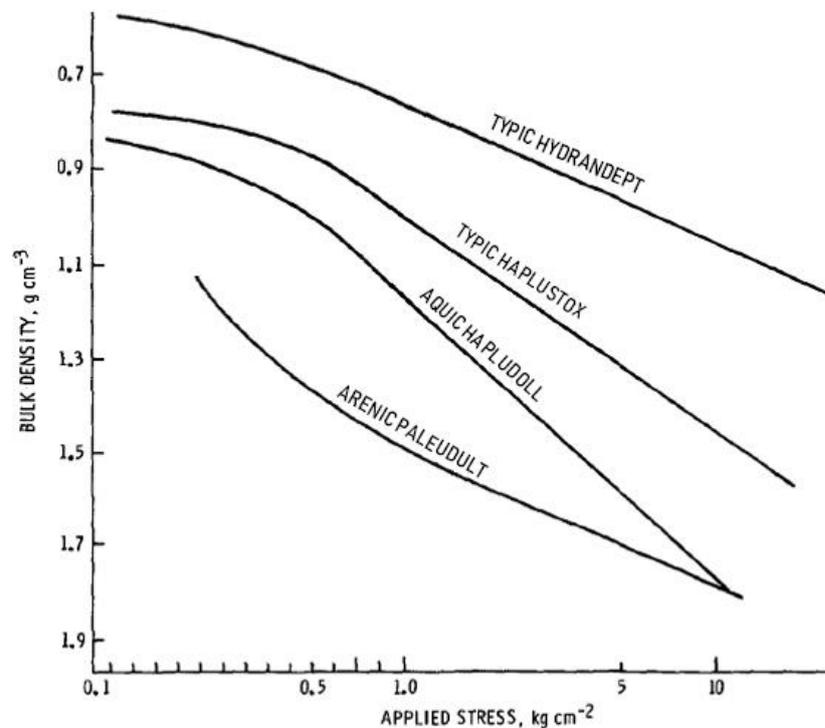
Na agricultura convencional, a compactação costuma ser solucionada com o revolvimento do solo, mas os processos naturais, como os ciclos de molhamento-secagem nos solos com alto conteúdo de argilas expansivas, bioturbação e a presença de micorrizas arbusculares (MIRANSARI et al., 2008), podem atenuar os efeitos da compactação superficial. Entretanto, em solos arenosos, que possuem baixo conteúdo de minerais expansivos, a restauração da estrutura física por meio dos ciclos de umedecimento-secagem não é tão efetiva.

A compactação por tráfego proporciona o aumento da resistência à penetração, o que dificulta o crescimento das raízes, diminui a infiltração de água no solo e a condutividade hidráulica do solo saturado (HÅKANSSON, 2005). Quando a compactação reduz a condutividade hidráulica do solo, principalmente nas camadas subsuperficiais, facilita a sua saturação e o escoamento superficial, o que, além de reduzir o número de dias possíveis para a realização de operações em campo, pode causar erosão.

Cada tipo de solo tem comportamento diferente a uma mesma pressão aplicada. Curvas de compressão de quatro solos com texturas e tipos de argilominerais diferentes foram

comparadas nas mesmas condições de laboratório: no solo denominado Typic Hydrandept (Neossolo), do Havaí, os produtos do intemperismo são alofanos; no Typic Haplustox (Latosolo), do Brasil, há grandes quantidades de caulinita e óxidos de ferro; no Aquic Hapludoll (Chernossolo), de Minnesota (Estados Unidos), há montmorilonita e mica; e no Arenic Paleudult (Argissolo), da Carolina do Norte (Estados Unidos), o argilomineral predominante é a caulinita. Cada solo obteve um resultado diferente de densidade sob uma mesma pressão aplicada (Figura 1), já que a composição do solo (textura, mineralogia, matéria orgânica) influencia na sua capacidade de compactação. Solos com alta quantidade de argila, geralmente têm maiores índices de compressão (LARSON et al., 1980; ARVIDSSON, 1998). Já a matéria orgânica do solo ajuda a diminuir os efeitos da compactação ao aumentar a estabilidade da estrutura do solo e o tornar mais resistente à degradação, além de diminuir a densidade do solo e aumentar a sua porosidade (ARTHUR et al., 2013).

Figura 1 – Curvas de compressão sob a mesma pressão aplicada em quatro tipos de solos com texturas e composições mineralógicas diferentes



Fonte: Larson et al. (1980).

A vegetação de cobertura, dependendo da espécie e do estágio de crescimento da planta, pode proporcionar maior ou menor proteção ao solo à compactação, pois a biomassa funciona

como um amortecedor da pressão aplicada (FEHMI et al., 2001). Por isso, solos descobertos são mais suscetíveis à compactação e à erosão.

As gramíneas perenes são muito efetivas no auxílio à estabilidade do solo devido a sua grande quantidade de raízes e distribuição radicular, as quais aumentam o contato entre partículas minerais e agregados (SILVA & MIELNICZUK, 1997). Dentro dos microagregados, também existe a matéria orgânica que está fisicamente protegida da biodegradação e que auxilia na formação da estrutura física do solo e no amortecimento das cargas. Essa matéria orgânica apenas se tornará disponível aos microrganismos após a destruição dos microagregados pela degradação do solo (BALESDENT et al., 2000).

Para que a contribuição da matéria orgânica na estabilização dos agregados do solo seja contínua é preciso que material orgânico seja acrescentado ao sistema continuamente (CAMPOS et al., 1995), processo que ocorre de maneira natural após a decomposição da vegetação de cobertura, explicitando a importância da não supressão vegetal.

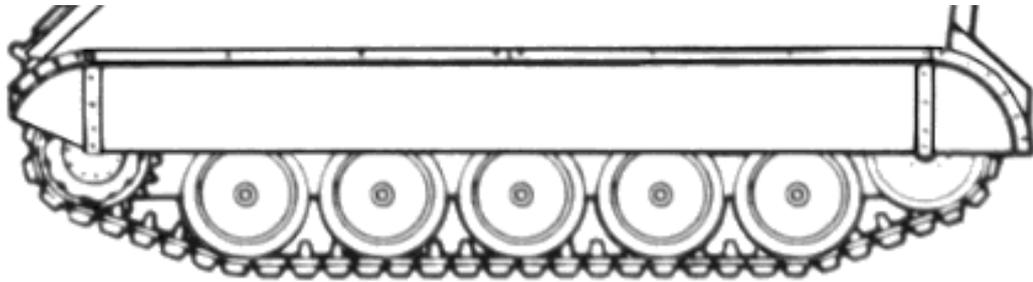
A resiliência do ecossistema depende também das condições climáticas (precipitação pluvial e temperatura). Em regiões com grandes volumes de chuva, geralmente as plantas se recuperam após o impacto pelo tráfego de veículos. Entretanto, em regiões desérticas, onde o volume total de chuva é menor que 250 mm ao ano, o impacto de apenas um tráfego já se torna severo, pois as plantas demoram a se recuperar (HANSEN & OSTLER, 2005).

2.3 EFEITOS DE VEÍCULOS COM ESTEIRAS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Os fatores que interferem na intensidade da compactação do solo podem ser relacionados ao veículo e ao ambiente. A área de contato, superfície de pressão, deslizamento e formato da esteira; o peso total, velocidade e modo de operação do veículo são os fatores que influenciam na intensidade da compactação. Os fatores relacionados ao ambiente que exercem influência sobre a intensidade da compactação são a umidade, o tipo de solo, a espécie e o estágio de crescimento da vegetação e as condições climáticas (AYERS, 1994).

A esteira consiste em um número de eixos rodando por uma superfície estacionária (Figura 2) e cada roda cria um pulso de estresse no solo. As esteiras têm maior área de contato direto com superfície do solo do que os pneus, assim a pressão do peso do veículo sobre o solo será menor (WONG & PRESTON THOMAS, 1984).

Figura 2 – Sistema da esteira da viatura blindada M113



Fonte: Cooke (2008).

Na superfície do solo é a área de contato da esteira que determinará o distúrbio. Porém, em subsuperfície, a pressão aplicada pelo peso do veículo é a que determinará a extensão do efeito da compactação no solo em profundidade (ALAKUKKU et al., 2003).

As esteiras podem ser feitas inteiramente de metal ou de borracha, ou com uma mistura dos dois materiais: metal com *pads* de borracha no centro (esteira da viatura blindada M113 BR). As esteiras de metal não podem ser utilizadas para tráfego sobre concreto, mas proporcionam maior distribuição de pressão ao longo de toda a área (MARSILI & SERVADIO, 1996). Entretanto, nas esteiras de borracha, a pressão se concentra principalmente abaixo dos *pads*, não sendo distribuída de forma homogênea em todo seu comprimento (AYERS, 1994), ou no eixo vertical de cada uma das rodas, no caso das esteiras feitas somente de borracha (WONG & PRESTON THOMAS, 1984). O efeito da distribuição desigual de pressão sobre a esteira ocorre apenas na camada superficial do solo. Abaixo de 0,30 m, o efeito do estresse tende a ser padronizado, com maiores pressões localizadas em volta do eixo vertical abaixo da esteira (ALAKUKKU et al., 2003).

O aprofundamento do rastro (“*sinkage*” ou “*soil rutting*”) é definido como o solo da camada superficial que foi deslocado ao redor da esteira, compactado ou que a resistência do solo foi perdida devido ao remodelamento causado pelo tráfego do veículo. É uma função dos parâmetros do veículo, incluindo: pressão sobre o solo, largura e comprimento da esteira e resistência do solo (SULLIVAN & ANDERSON, 2000).

As esteiras têm como vantagens escorregar menos, provocar rastros com menores profundidades em solos molhados ou macios e proporcionar um *design* mais compacto ao veículo (ALAKUKKU et al., 2003). Entretanto, há pouca diferença entre a compactação causada na camada superficial do solo entre tratores com esteiras de borracha e com pneus, pois, apesar da pressão sobre o solo ser menor com a esteira, ela também fica mais tempo em

contato com a superfície devido ao seu comprimento, tem distribuição de pressão desigual e transmite vibração ao solo (HOLF & HADAS, 1984).

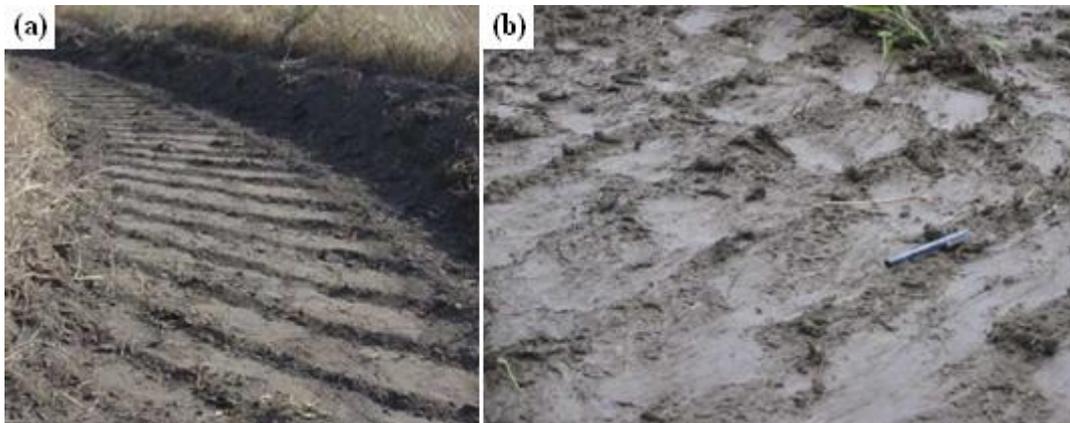
A primeira passada do veículo, geralmente, é a maior causadora da compactação do solo, mas as passadas subsequentes podem continuar a compactar o solo, aumentando o risco de compactação das camadas subsuperficiais (BRAUNACK, 1986; PROSSER et al., 2000). A velocidade de tráfego do veículo também altera a taxa de deformação do solo, pois ela influencia no tempo de estresse aplicado: quanto menor a velocidade do veículo, maior é o tempo de contato com o solo, aumentando a compactação (HORN et al., 1989). Se os efeitos do tráfego não tiverem passado de um ano para o outro, tráfegos em anos posteriores podem causar efeitos cumulativos no estado de compactação, indicando a importância do controle e de evitar tráfegos desnecessários (ALAKUKKU et al., 2003).

O modo de operação do veículo, ou seja, o tipo de manobra efetuada, se em linha reta ou em curva e o seu ângulo, é determinante na intensidade da compactação (LEBEDEV & SIDOROV, 1965; BRAUNACK, 1986). As curvas acentuadas aumentam o distúrbio do solo e o tamanho dos rastros de um blindado M113, enquanto o rastro da esteira de dentro da curva tende a provocar maior distúrbio na vegetação após o tráfego do blindado do que o de fora (AYERS, 1994).

Dentre os fatores ambientais que afetam a compactação do solo, a água funciona como um lubrificante entre as partículas e, geralmente, quanto maior for a umidade do solo, mais fácil será a reordenação das partículas nos espaços vazios e, por consequência, maior será a compactação (AYERS, 1994). Tecnicamente, um solo saturado não compacta, já que a água está presente no meio das partículas. Entretanto, ele está num estado fraco de resistência e o distúrbio causado na continuidade dos poros e a compactação são percebidos após a sua secagem. Por este motivo é de extrema importância evitar o tráfego em solos molhados (ALAKUKKU, 2012).

O tráfego de um blindado militar M1A1 em solos com textura franco-siltosa e franco argilo siltosa molhados e secos proporcionou o aumento significativo da resistência à penetração do solo no primeiro caso, além da redução da biomassa de gramíneas (ALTHOFF & THIEN, 2005). Quando secos os solos foram deslocados em algumas áreas até uma profundidade de 0,30 m (Figura 3a) e quando molhados as superfícies dos dois tipos de solos foram rasgadas (Figura 3b) (ALTHOFF & THIEN, 2005).

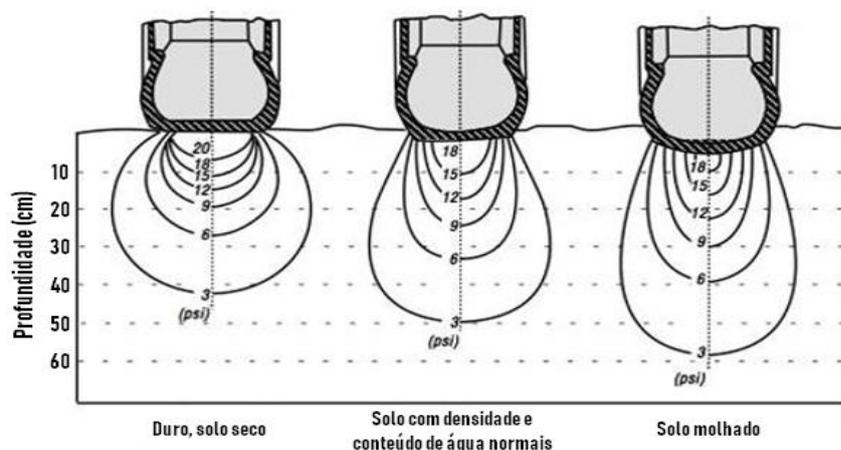
Figura 3 – Efeito da passada do blindado militar M1A1 (63 Mg) em solos com textura franco-siltosa seco (a) e franco argilo siltosa molhado (b)



Fonte: Althoff & Thien (2005).

O aumento da umidade provoca a redução da resistência do solo e o torna sujeito à compactação quando, principalmente, próximo à capacidade de campo. Quando uma mesma pressão é aplicada no solo em diferentes condições de umidade, a compactação propagada em profundidade tende a ser maior com o aumento de conteúdo de água. Como exemplo, abaixo observa-se que um pneu de trator provoca efeitos diferenciados ao longo do perfil e de aprofundamento na superfície de acordo com a umidade: com o solo seco, o efeito da compactação alcança 40 cm de profundidade, já com o solo molhado, o efeito chega a 60 cm (Figura 4).

Figura 4 – Compactação do solo em profundidade e aprofundamento do rastro em função da variação da umidade do solo, sob a mesma pressão exercida por um pneu de trator



Pressão de inflação de 12 psi e pressão sobre o solo de 1.650 psi.
Fonte: USDA, adaptado de Soehne (1958).

O Campo de Instrução de Santa Maria (CISM) é uma Organização Militar do Exército Brasileiro, localizado na cidade de Santa Maria, RS. Com área de 5.866,9 hectares, o CISM é o maior campo de instrução de viaturas blindadas do Brasil (quanto à intensidade de uso e número de veículos usados anualmente). O CISM é utilizado, direta ou indiretamente, por cerca de 15 mil militares de todo o país - e até mesmo de países estrangeiros - para o treinamento e execução de exercícios militares de tropas blindadas. Parte da área do CISM também é utilizada para agricultura e pecuária por arrendatários particulares (SANT'ANA, 2012).

2.4 CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA

Atualmente, as unidades militares que mais utilizam o CISM são o CI Bld (Centro de Instrução de Blindados), 1º RCC (1º Regimento de Carros de Combate) e o 29º BIB (29º Batalhão de Infantaria Blindado). Por volta de cento e quarenta blindados efetuam exercícios de treinamento no CISM, incluindo o M113 BR (11,4 Mg), o M60 (48,7 Mg), o Leopard A1 sabiex (45 Mg), o Leopard 1A1 (42,4 Mg) e Leopard 1A5 (42,4 Mg), além de outros veículos mais leves que também trafegam a área. Os exercícios são realizados em quase todo o ano, com exceção dos meses de dezembro e janeiro (SANT'ANA, 2012).

Em relação à geologia, o CISM faz parte da Formação Santa Maria (SARTORI, 2009), onde predominam os sedimentos arenosos do Membro Passo das Tropas e argilo-siltosos do Membro Alemoa. Os solos encontrados na área são classificados, principalmente, como Argissolos nas porções mais elevadas do relevo (coxilhas sedimentares) e Planossolos nas várzeas (planícies aluviais) (DALMOLIN & PEDRON, 2009). A paisagem vegetal original é um mosaico de fragmentos florestais e campos nativos, atualmente alterados pela introdução de espécies exóticas e agricultura (MARCHIORI, 2009).

Devido ao tipo de geologia e solo, a área já possui fragilidade natural aos processos erosivos e o intenso uso do local para treinamento com viaturas blindadas pode intensificá-los. Atualmente, a maior parte dos impactos ambientais que ocorrem na área, como destruição da cobertura vegetal, erosão, ravinas e voçorocas, encontra-se próxima às estradas e rotas de blindados e é causada pelo tipo de material que reveste a sua superfície, falta de manutenção, drenagem superficial ineficiente e compactação do solo (Figura 5) (SANT'ANA, 2012).

Figura 5 – Processos erosivos encontrados na área do CISM



Fonte: Sant’Ana (2012).

2.5 VIATURA BLINDADA DE TRANSPORTE DE PESSOAL M113 BR

A Viatura Blindada de Transporte de Pessoal (VBTP) do modelo M113 foi lançada em 1960 e é a maior família de veículo blindado com esteira do mundo, com cerca de 80 mil unidades e mais de 40 variações (Figura 6). No início da década de 70, o Brasil adquiriu suas primeiras unidades do M113 do Exército dos Estados Unidos (GRAY, 2011). Atualmente, no nosso país, as VBTP são empregadas na mobilidade das organizações militares das brigadas blindadas. Em combate, elas são utilizadas em conjunto com as Viaturas Blindadas de Combate Carros de Combate (VBCCC), como o Leopard 1A5. Entretanto, as VBTP M113 não possuem potência suficiente para acompanhar as VBCCC’s em campo: como exemplo, faltam-lhe os equipamentos de visão para combate noturno, incompatibilidade dos equipamentos de comunicação, baixa proteção blindada e impossibilidade de tiro preciso das metralhadoras calibre .50 quando em movimento (OLIVEIRA, 2013).

Assim, com início em 2002, o Exército Brasileiro (EB), dentro da Estratégia Nacional de Defesa, está executando o projeto que visa à modernização da frota atual e de revitalização das VBTP em melhor estado de conservação. Em 2011, o EB fechou contrato com a BAE

Systems para a manutenção de 150 carros modelo M113B para o padrão M113A2 Mk1, nomeados no Brasil como M113 BR, concluído em dezembro de 2015. No mesmo ano, um novo contrato foi assinado com a empresa para a revitalização de mais 236 unidades, com 146 já recebidos em 2016 (BASTOS & HIGUCHI, 2016).

O projeto M113 BR tem como objetivo a restauração da capacidade operacional e prolongação da vida útil dos blindados, alcançado por meio da substituição de partes estruturais (como motores e transmissões), componentes (sistemas de tração e esteiras de borracha) e equipamentos (periscópio termal e adoção do rádio de última geração FALCON III), podendo ser utilizados até mesmo materiais usados, mas em bom estado de conservação (OLIVEIRA, 2013). Outro objetivo é a troca por peças e materiais nacionais para a diminuição dos custos de manutenção, já que pelo grande custo de restauração das peças importadas, 70% da frota de VBTP estava parada (NORONHA, 2013).

Apesar de ainda não possibilitarem o emprego eficiente junto com a VBCCC Leopard 1A5, as alterações garantiram sobrevivência às VBTP e a manutenção dos padrões da tropa blindada brasileira (OLIVEIRA, 2013). Atualmente, o M113 BR é a viatura mais usada em operações do 29º BIB e de outras unidades de Santa Maria - onde estão alocadas 80% das viaturas de todo o país -, devido ao fato de ser um carro anfíbio, simples, durável e econômico (NORONHA, 2013).

3. OBJETIVO

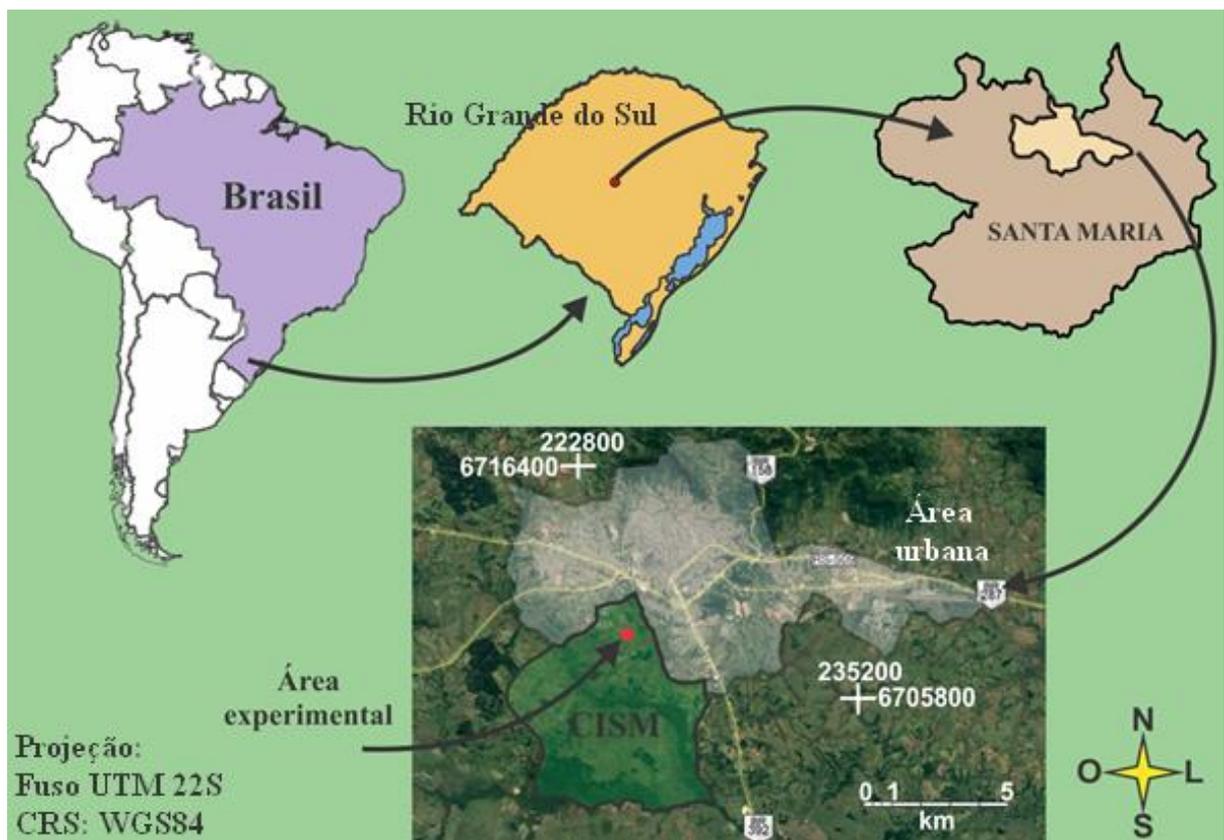
- 1) Avaliar os efeitos da intensidade de tráfego em linha reta e em pivotamento da VBTP M113 BR nas propriedades físicas e mecânicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM), uma área militar pertencente ao Exército Brasileiro. O CISM possui 5.866,9 hectares e está localizado a sudoeste da cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, entre as coordenadas 53°48'12" e 53°53'23"W e 29°42'31" e 29°47'39"S (Figura 6). O relevo do local varia de plano a ondulado (0 a 12% de declividade), com elevações que variam de 60 a 140 m, formado por coxilhas sedimentares e constituída por material geológico sedimentar do Triássico, pertencentes ao Grupo Rosário do Sul e Formação Santa Maria. Predominam no CISM siltitos

argilosos maciços correspondentes a depósitos lacustres e de planícies de inundação (SARTORI, 2009).

Figura 6 – Localização do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM – área em verde no mapa) e da área experimental

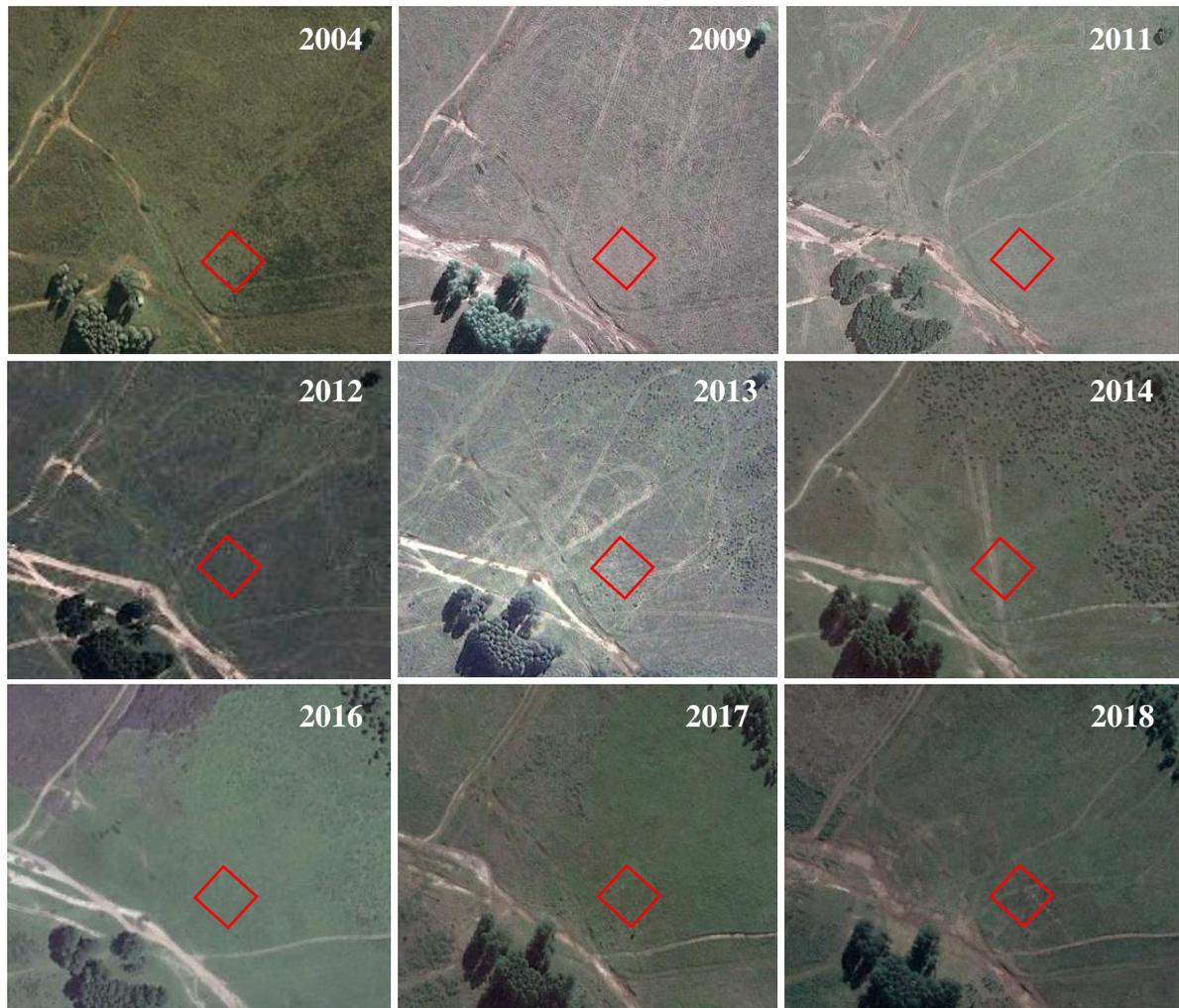


Fonte: Autora (2019); imagem orbital obtida do Google Earth (GOOGLE LLC, 2019).

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é subtropical úmido sem período de seca definido (Cfa) (ALVARES et al., 2013), com temperatura média compensada anual de 19,3 °C (mínima anual 14,7 °C e máxima anual 25,3 °C) e precipitação pluvial anual de 1.796,2 mm (INMET, 2019b).

O tráfego de veículos já tinha sido realizado na área experimental nos anos anteriores à realização deste estudo. Imagens captadas por satélite mostram a intensidade do tráfego nos últimos 15 anos, onde observa-se marcas de rastros deixadas pelos veículos, principalmente em 2009, 2013, 2014 e 2018 (Figura 7). Além disso, a área também apresenta histórico de queimadas e os resquícios de materiais vegetais carbonizados (carbono pirogênico) ainda são encontrados abundantemente no solo, principalmente no horizonte Au.

Figura 7 – Imagens orbitais da progressão histórica de uso da área experimental



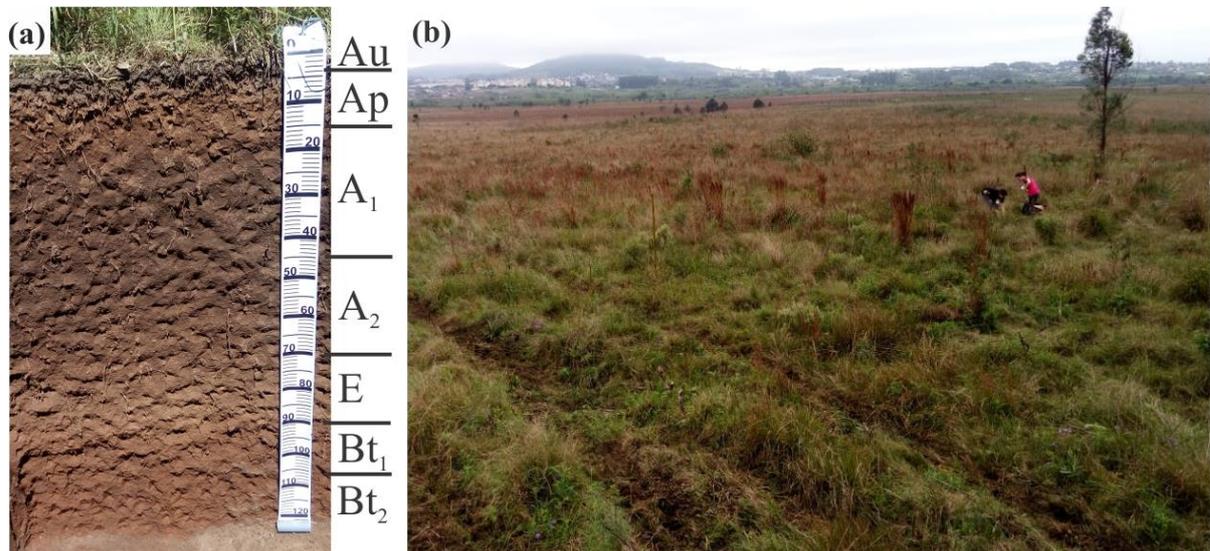
Fonte: Autora (2019); imagens orbitais obtidas do Google Earth (GOOGLE LLC, 2019).

O solo da área de estudo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Ta Distrófico abruptico (SANTOS et al., 2018), Abruptic Alisol (Densic, Differentic, Loamic, Profondic) (IUSS WORKING GROUP WRB, 2015) e Arenic Hapludult (SOIL SURVEY STAFF, 2014) (Figura 8).

A descrição morfológica do solo (APÊNDICE A) foi realizada de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2015). Foram avaliadas informações sobre o ambiente (localização, declive, drenagem, relevo, erosão, altitude, material de origem, pedregosidade, rochiosidade, vegetação, uso atual, unidade de mapeamento, clima, data) cor úmida, estrutura, porosidade, textura, consistência, quantidade de raízes, profundidade dos horizontes, tipo de transição entre horizontes e presença de outras características (concreções, *slikensides*, plintitas e bioporos). Foram coletadas amostras de solo com estrutura não

preservada em cada horizonte do perfil para as análises químicas e granulométricas de acordo com Teixeira et al. (2017).

Figura 8 – Perfil de solo (a) e paisagem da área experimental (b)



Au: horizonte A antrópico; Ap: horizonte A agrícola; A: horizonte A natural; E: horizonte eluvial; Bt: horizonte B textural

Fonte: Autora (2019).

Para a caracterização da composição botânica e massa seca da parte aérea da vegetação presente na área experimental foram realizadas amostragens em três parcelas de 1 m², alocadas aleatoriamente em posições da área com vegetação de porte baixo (0,30 m), médio (0,60 m) (predominante no dia do experimento) e alto (1,10 m) (Figura 9). O material vegetal coletado foi seco em estufa a 65 °C até atingir peso constante e pesado posteriormente (HAYDOCK & SHAW, 1975).

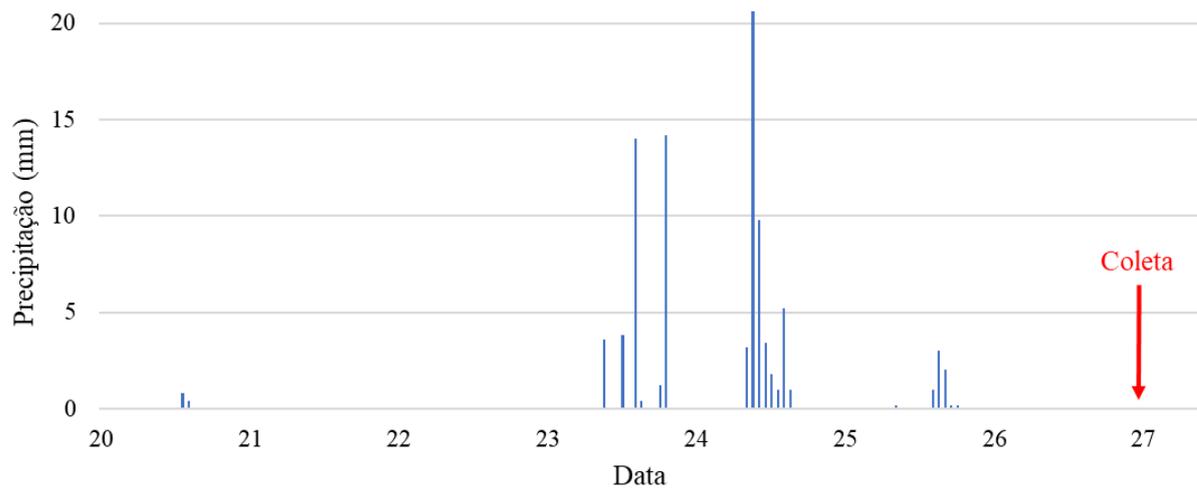
O experimento de avaliação do efeito do tráfego da VBTP M113 BR nas propriedades físicas e mecânicas do solo foi realizado no dia 27 de setembro de 2018, dois dias após uma precipitação acumulada de 89,8 mm ocorrida ao longo de 3 dias (Figura 10) (INMET, 2019a). Além do fato da alta umidade favorecer a detecção do efeito do tráfego, optou-se por fazer o estudo sob estas condições devido aos treinos militares também ocorrem nessa situação.

Figura 9 – Parcelas demarcadas para a coleta de cobertura vegetal: vegetação de porte baixo (a), médio (b), alto (c) e aspecto de uma parcela após a retirada da biomassa (d)



Fonte: Autora (2019).

Figura 10 – Distribuição de chuva em Santa Maria na semana anterior ao tráfego do M113 BR na área experimental (20 a 27 de setembro de 2018)



Fonte: INMET (2019a).

A VBTP M113 BR utilizada para a avaliação do efeito da intensidade de tráfego e do modo de operação sobre as propriedades físicas do solo deste estudo é utilizada pelo Exército Brasileiro apenas para o transporte de carga (pessoas, equipamentos e munições) (Figura 11). O M113 BR tem dimensões de 2,53 m de altura, 2,67 m de largura, 4,86 m de comprimento, desloca-se sobre duas esteiras de 0,38 m de largura e 3,05 m de comprimento, munidas com *pad* de borracha de 0,15 x 0,10 m (Figure 11d). No momento do tráfego, o M113 BR transportou apenas dois tripulantes, o que resultou em uma massa total de 10.155 kg, resultando em uma pressão estática aplicada ao solo de 44 kPa. Durante o tráfego, que ocorreu com velocidade média de 15 km h⁻¹, a pressão aplicada sobre o solo não foi monitorada.

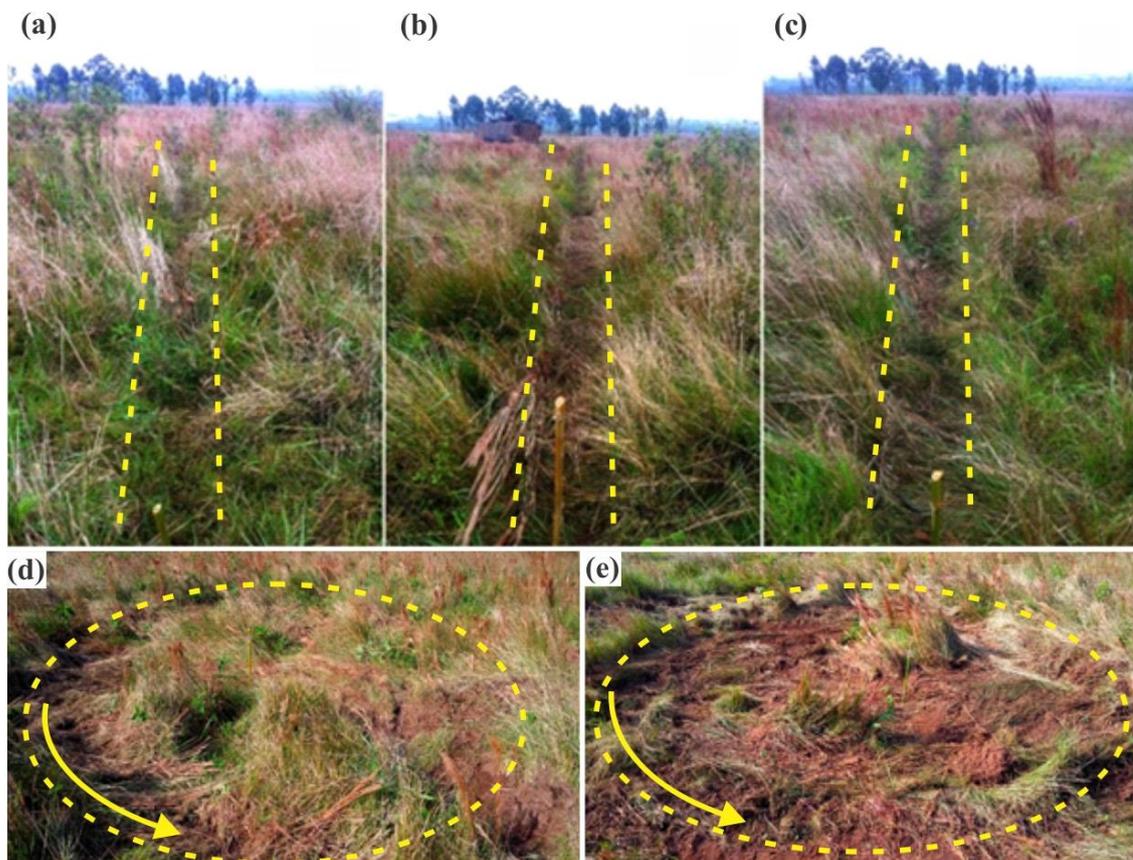
Figura 11 – VBTP M113 BR utilizado no experimento: vista frontal (a), vista lateral (b), compartimento de carga (c) e rodado - esteira (d)



Fonte: Autora (2018).

O estudo foi feito em delineamento experimental inteiramente casualizado, avaliando-se, de forma independente, o efeito do tráfego em linha reta e em pivotamento (giro no mesmo lugar com uma das esteiras frenadas). Para o tráfego em linha reta (Figuras 12a, b, c) foram avaliadas intensidades de tráfego (IT) com um (IT₁), dois (IT₂) e cinco (IT₅) tráfegos sobre o mesmo local, adicionando-se mais dois tratamentos sem tráfego (ST). A opção por usar dois tratamentos sem tráfego foi baseada na variabilidade maior que a natural do solo devido ao histórico de tráfego na área experimental.

Figura 12 – Área de estudo após 1 passada (a), 2 passadas (b) e 5 passadas (c) do M113 BR em linha reta e 1 pivotamento (d) e 2 pivotamentos (e)



Traços amarelos indicam a linha do rodado e a área de pivotamento.
Fonte: Autora (2018).

Os tratamentos IT₁, IT₂ e IT₅ foram aplicados em faixas de 18 m de comprimento e aproximadamente 0,40 m de largura. Cada faixa foi dividida em 18 parcelas de 1 m, das quais foram sorteadas cinco delas para comporem as unidades amostrais de cada intensidade de tráfego. Nas duas faixas sem tráfego, localizadas em ambas as laterais das faixas de tráfegos,

também foram sorteadas cinco parcelas para comporem suas unidades experimentais. Ao total, 25 unidades amostrais foram usadas neste estudo.

Para o experimento com deslocamento em pivotamento (Figuras 12d e 12e) foram avaliadas intensidades de tráfego com um (IT_{1P}) e dois (IT_{2P}) pivotamentos, cada um aplicado em um único ponto da área. Em cada ponto, cinco parcelas foram marcadas por sorteio no rastro do veículo para constituírem as unidades amostrais. Dois tratamentos ST também foram considerados no experimento em pivotamento. Ao total, 20 unidades amostrais foram usadas neste estudo.

Amostras com estrutura preservada foram coletadas com anéis metálicos (3,9 cm de altura e 5,7 cm de diâmetro), nas camadas de 0,00-0,04, 0,10-0,14 e 0,20-0,24 m. Essas amostras foram utilizadas para a determinação da densidade do solo (D_s , $Mg\ m^{-3}$), porosidade total (PT , $m^3\ m^{-3}$), macroporosidade (Ma , $m^3\ m^{-3}$), microporosidade (Mi , $m^3\ m^{-3}$) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s , $mm\ h^{-1}$). Considerando a homogeneidade textural dos horizontes superficiais do solo local, amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas apenas nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m. Posteriormente, foi feita a análise granulométrica, carbono orgânico total e análises químicas de rotina.

A distribuição granulométrica foi analisada para quantificar o conteúdo de areia, silte e argila do solo (GEE & BAUDER, 1986), conforme procedimento de dispersão descrito por Suzuki et al. (2015).

O carbono orgânico total (C_{org} , $g\ kg^{-1}$) foi quantificado pelo método de combustão úmida (NELSON & SOMMERS, 1982), pelo procedimento de Mebius no bloco digestor (adaptado por TEIXEIRA et al., 2017).

Os parâmetros químicos de rotina utilizados para a classificação do solo, tais como saturação por bases e por alumínio, alumínio trocável e atividade da argila, foram determinados conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

As amostras de solo com estrutura preservada foram saturadas durante 48 h para a determinação da K_s com um permeâmetro de carga constante (TEIXEIRA et al., 2017). Posteriormente, as amostras foram novamente saturadas durante 48 h, pesadas para determinação da PT e submetidas à tensão de 6 kPa em coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006) para determinação da Mi . Na sequência, as amostras foram transferidas para estufa a 105 °C. A PT foi considerada o conteúdo volumétrico de água na saturação; a Mi foi considerada o conteúdo volumétrico de água retido na tensão de 6 kPa; e a Ma foi calculada pela diferença $PT-Mi$ (DANIELSON & SUTHERLAND, 1986).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP, MPa) foi medida no campo com o penetrógrafo digital Eijkelkamp, munido de coletor automático de dados e haste com cone de 1 cm de diâmetro e ângulo de 60°. A velocidade de penetração foi de aproximadamente 2 cm s⁻¹ e a aquisição de dados a cada 0,01 m, até 0,4 m de profundidade. Em cada unidade experimental foram feitas cinco medições.

Amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas simultaneamente à avaliação da resistência mecânica do solo à penetração para determinação da umidade gravimétrica do solo no momento do tráfego. O conteúdo gravimétrico de água foi multiplicado pela densidade do solo da camada correspondente para ser expresso como conteúdo volumétrico de água (θ , m³ m⁻³).

Outro conjunto de 36 amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas com anéis metálicos (3 cm de altura e 5,7 cm de diâmetro) nas camadas de 0,00-0,04, 0,10-0,14 e 0,20-0,24 m de uma área sem tráfego para a estimativa da capacidade de suporte de carga do solo. As amostras foram saturadas e divididas em quatro grupos contendo nove amostras cada um. Para que houvesse variação de Ds em cada grupo, eles foram formados com três amostras de cada camada de solo. A drenagem em cada grupo foi diferente para que eles ficassem com diferentes conteúdos de água. Os grupos um e dois foram submetidos às tensões 6 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006), respectivamente; o grupo três foi submetido à tensão de 100 kPa utilizando um extrator por pressão em pratos de cerâmica (KLUTE, 1986); e o grupo quatro também foi submetido à tensão de 100 kPa, mas maior quantidade de perda de água foi permitida por evaporação.

Ao final de cada etapa, as amostras foram pesadas para determinação do θ e submetidas a cargas sequenciais estáticas de 0, 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, durante 5 minutos para cada carga (SILVA et al., 2000), em uma prensa de compressão uniaxial. Ao final da aplicação das cargas, as amostras foram transferidas para estufa a 105 °C, para posterior cálculo da Ds. A capacidade de suporte de carga do solo foi estimada pela pressão de preconsolidação (σ_p), que foi determinada em cada amostra pelo método de Casagrande (CASAGRANDE, 1936), utilizando o suplemento SCC (GUBIANI et al., 2017). Um modelo não-linear (BUSSCHER, 1990) foi ajustado aos dados de σ_p , Ds e θ :

$$\sigma_p = aDs^b\theta^c \quad (1)$$

onde a, b e c são parâmetros de ajuste.

A normalidade das variáveis foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade de variâncias foi avaliada pelo teste Welch. A transformação logarítmica foi aplicada nas

variáveis sem aderência à distribuição normal. Em cada camada de solo, o efeito do tráfego sobre D_s , PT, Ma, Mi, Ks, RP e θ foi avaliado pela análise de variância ($p \leq 0,05$). Nos casos em que houve efeito do tráfego, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5. RESULTADOS

A avaliação de dois tratamentos ST foi realizada devido à variabilidade do solo proporcionada pelo uso e histórico de tráfego da área experimental. O tratamento ST_{DB} (sem tráfego, densidade baixa) representa uma área sem tráfego no experimento, mas com tráfego em anos anteriores e uma densidade atual menor quando comparado ao ST_{DA} (sem tráfego, densidade alta).

5.1 DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO SOLO E CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL

A textura no perfil de solo é franco arenosa até 1,05 m. A variação no teor de argila nos horizontes A é de 11 g kg⁻¹, com decréscimo de pelo menos 29 g kg⁻¹ no horizonte E em relação ao horizonte A (Tabela 1). As transições entre os horizontes A são claras, se tornando abrupta entre os horizontes E e Bt₁ (Figura 8a). No horizonte Au a estrutura é granular. Nele também foi observado acúmulo de carvão oriundo de queimadas recorrentes da vegetação campestre. No horizonte Ap, a estrutura é laminar/maciça na camada de 0,08 a 0,15 m, enquanto que no restante do perfil predominou estrutura em blocos.

Tabela 1 – Caracterização do perfil do Argissolo Vermelho-Amarelo da área experimental

Hz	Prof. (m)	Cor úmida	Estrutura	Granulometria (g kg ⁻¹)			Classe textural
				Areia	Silte	Argila	
Au	0,00-0,03	10YR 4,5/2	gr., mod.	650	255	95	Franco arenosa
Ap	0,03-0,15	10YR 3,5/6	lam./ma. mod.	700	238	62	Franco arenosa
A ₁	0,15-0,45	10YR 3/1	ang. e sang., mod.	638	256	106	Franco arenosa
A ₂	0,45-0,70	10YR 3/2	ang. e sang., fr.	612	282	106	Franco arenosa
E	0,70-0,90	10YR 4/3	ang. e sang., fr.	630	304	66	Franco arenosa
Bt ₁	0,90-1,05	5YR 3/4	ang. e sang., mod.	551	289	160	Franco arenosa
Bt ₂	1,05-1,20+	5YR 3,5/3,5	ang. e sang., mod.	407	239	354	Franco argilosa

Estrutura: gr.: granular; lam.: laminar; ma.: maciça; ang.: angular; sang.: subangular; mod.: moderada; fr.: fraca. Fonte: Autora (2019).

A variabilidade da granulometria na área do experimento é pequena em ambas as camadas, de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m, e entre elas (Tabela 2). A diferença mais marcante na área foi o decréscimo de 13,74 para 6,29 g kg⁻¹ no Corg da camada de 0,00-0,10 m para a de 0,20-0,30 m.

Tabela 2 – Variabilidade da granulometria e conteúdo de carbono orgânico (Corg) nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m das 25 parcelas analisadas no estudo em linha reta

Atributo	Areia	Silte	Argila	Corg
	(g kg ⁻¹)			
0,00 - 0,10 m				
Média	671,7	222,9	105,4	13,74
Desvio padrão	29,4	27,8	18,2	2,53
CV (%)	4,38	12,48	17,30	18,41
Mínimo	628,7	172,3	70,9	11,05
Máximo	733,8	279,8	132,9	18,28
0,20 - 0,30 m				
Média	649,0	223,7	127,3	6,29
Desvio padrão	25,7	23,0	26,3	0,64
CV (%)	3,96	10,30	20,66	10,17
Mínimo	588,5	180,0	97,0	5,32
Máximo	693,4	270,1	191,9	7,59

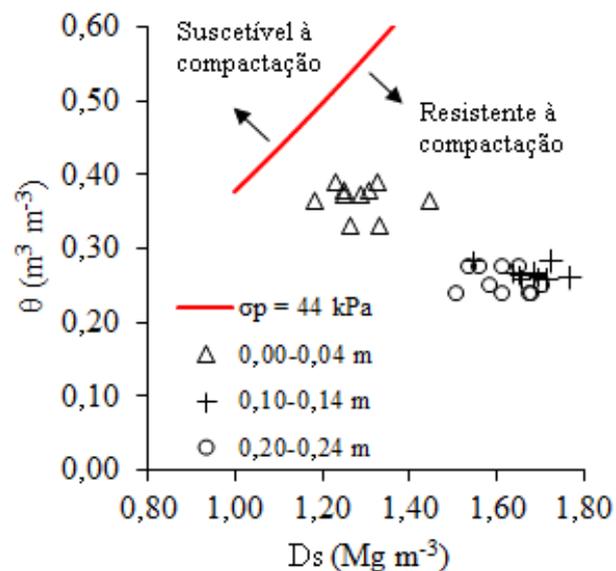
Fonte: Autora (2019).

A massa seca da parte aérea da vegetação foi de 7,8 Mg ha⁻¹, 9,7 Mg ha⁻¹ e 10,6 Mg ha⁻¹ 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. & Schltldl), pega-pega (*Desmodium incanum* (Sw.) DC), guanxuma (*Sida rhombifolia* L.), capim-annoni (*Eragrostis plana* Nees) e grama-forquilha (*Paspalum notatum* Fluegge).

No modelo ajustado $\sigma_p = 13.21761Ds^{1.854947}\theta^{-1.23373}$ todos os coeficientes foram significativos ($p \leq 0,05$) e o coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,75$. Fixando na equação uma σ_p de 44 kPa, que é a carga estática do M113 BR, as combinações de D_s e θ que resultam σ_p de 44 kPa geram uma curva no plano ortogonal θ - D_s (Figura 13). Acima da linha estão combinações (θ ; D_s) para as quais o tráfego do M113 BR compactaria o solo; abaixo da linha

estão combinações (θ ; D_s) para as quais o tráfego do M113 BR não compactaria o solo. Embora o tráfego tenha ocorrido com θ próximo ao de capacidade de campo, as combinações de θ e D_s determinadas nas parcelas ST_{DB} e ST_{DA} no momento de aplicação do tráfego nas outras parcelas (pontos na Figura 13) indicam que o tráfego aconteceu em condição de solo desfavorável à compactação pelo M113 BR.

Figura 13 – Combinações de D_s e θ que resultam σ_p de 44 kPa (carga estática do M113 BR) usando a equação (1) parametrizada para o solo deste estudo



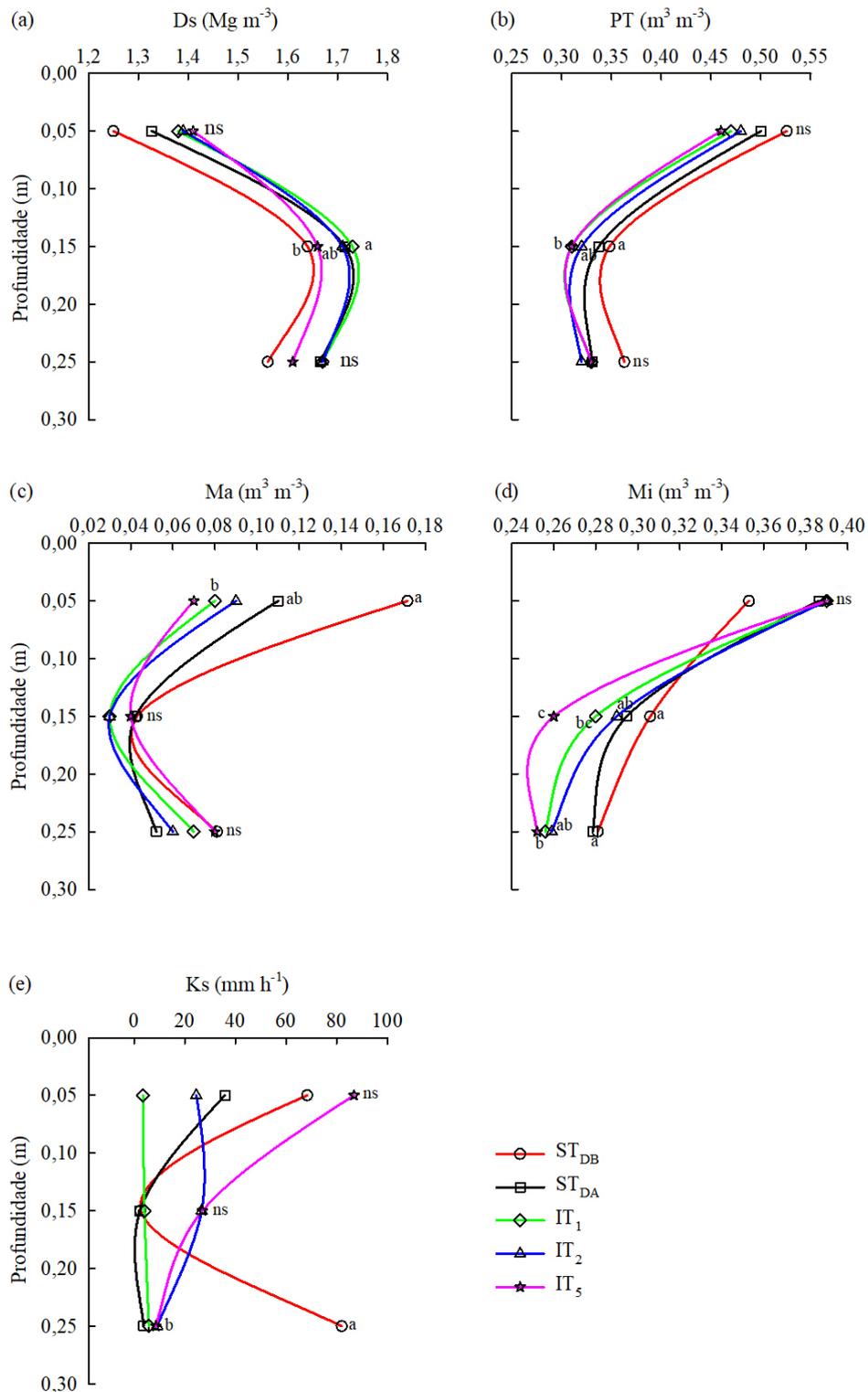
Fonte: Autora (2019).

5.2 TRÁFEGO DO M113 BR EM LINHA RETA

No momento do tráfego em linha reta, o conteúdo médio de água do solo era $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ - valor próximo ao conteúdo de água de capacidade de campo do horizonte A deste solo ($0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Casos com diferenças significativas associadas ao tráfego foram bem menos frequentes que os casos sem diferença na PT, Ma, Mi e Ks (Figura 14). Na camada superficial (0,00-0,04 m) houve diferença apenas na Ma, que foi maior no ST_{DB} . Na camada de 0,10-0,14 m, a maior PT, menor D_s e maior Mi foram observadas no ST_{DB} . Apenas a Ks diferiu na camada de 0,20-0,30 m, sendo maior no ST_{DB} .

Figura 14 – Densidade do solo (D_s) (a), porosidade total (PT) (b), macroporosidade (Ma) (c), microporosidade (Mi) (d) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) (e) nos tratamentos sem tráfego (ST_{DB} e ST_{DA}) e após 1, 2 e 5 tráfegos (IT_1 , IT_2 e IT_5) do M113 BR em linha reta



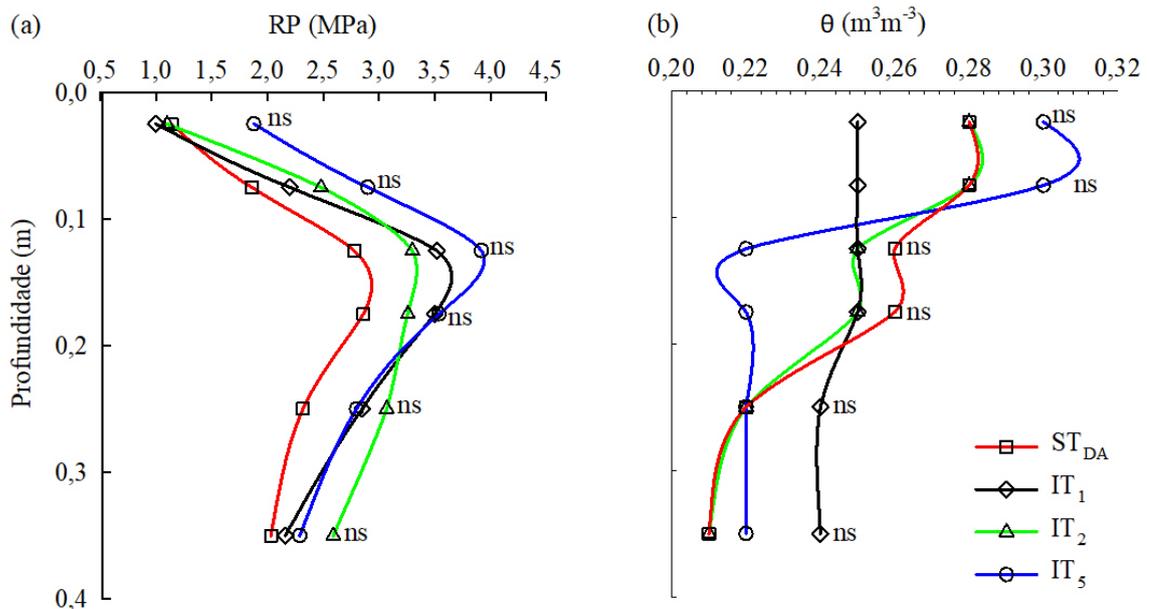
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

ns = não significativo pelo teste de Tukey (5%).

Fonte: Autora (2019).

Não houve diferença significativa na RP e θ , associadas com o tráfego, em nenhuma profundidade (Figura 15).

Figura 15 – Resistência do solo à penetração (RP) (a) e conteúdo volumétrico de água (θ) (b) ao longo do perfil de solo na situação sem tráfego (ST_{DA}) e com 1, 2 e 5 tráfegos (IT_1 , IT_2 e IT_5) do M113 BR em linha reta



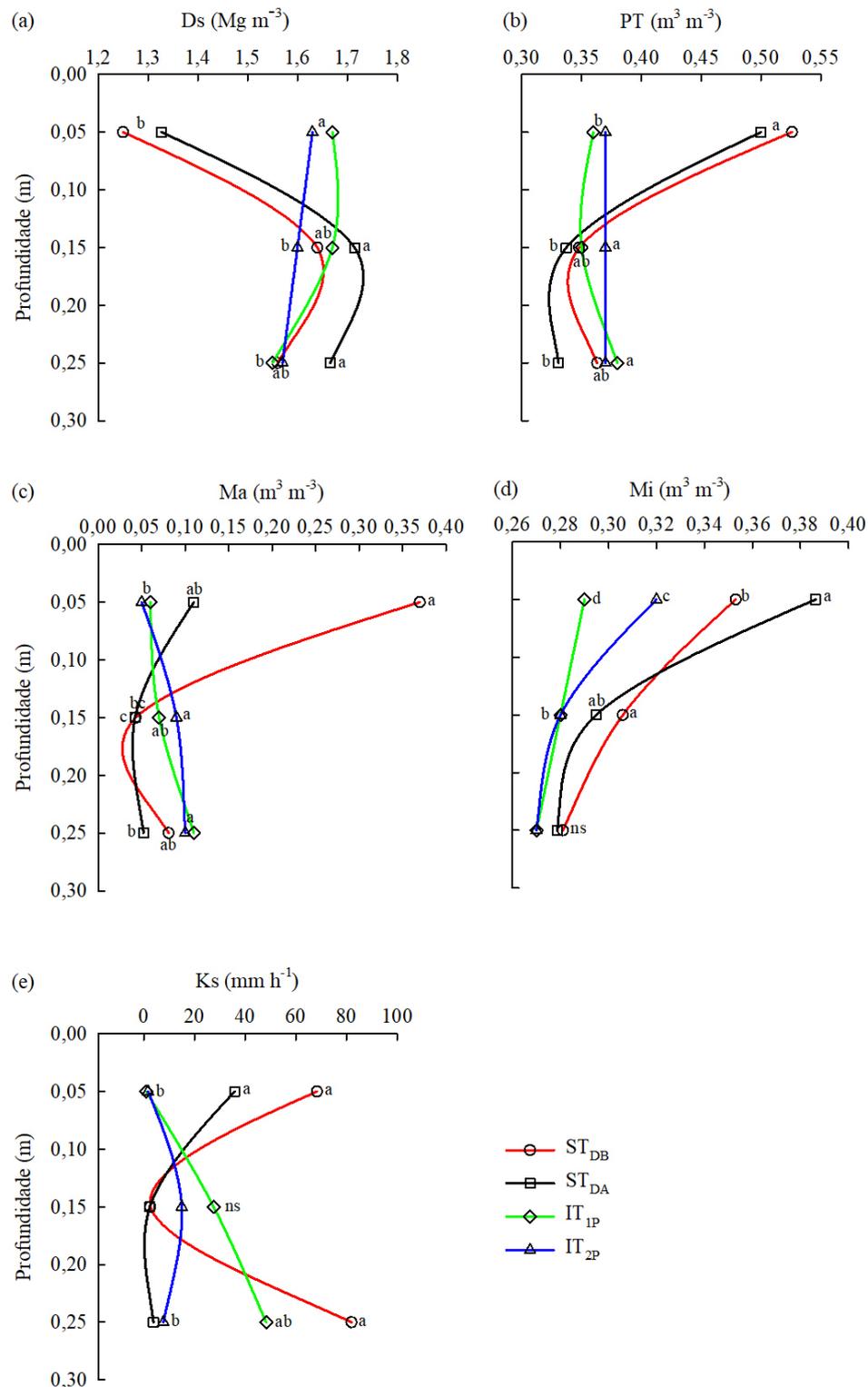
ns = não significativo pelo teste de Tukey (5%).
Fonte: Autora (2019).

5.3 TRÁFEGO DO M113 BR EM PIVOTAMENTO

O efeito do pivotamento nas propriedades do solo foi nítido na camada de 0,00-0,04 m, mas pouco perceptível nas demais camadas (Figura 16). Um pivotamento foi suficiente para aumentar a D_s e diminuir a PT , Ma , M_i e K_s na primeira camada (Figura 16). Nessa mesma camada, o aumento de um para dois pivotamentos não afetou a D_s e nem a PT , Ma e K_s , mas houve diferença significativa na M_i . Nas demais camadas, as poucas diferenças nem sempre estiveram claramente associadas com o tráfego.

A RP não foi afetada pela intensidade de pivotamento em nenhuma camada (Figura 17a) e o θ diferiu apenas nas camadas de 0,25 e 0,35 m (Figura 17b).

Figura 16 – Densidade do solo (D_s) (a), porosidade total (PT) (b), macroporosidade (Ma) (c), microporosidade (Mi) (d) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) (e) nos tratamentos sem tráfego (ST_{DB} e ST_{DA}) e após 1 e 2 pivotamentos (IT_{1P} e IT_{2P}) do M113 BR

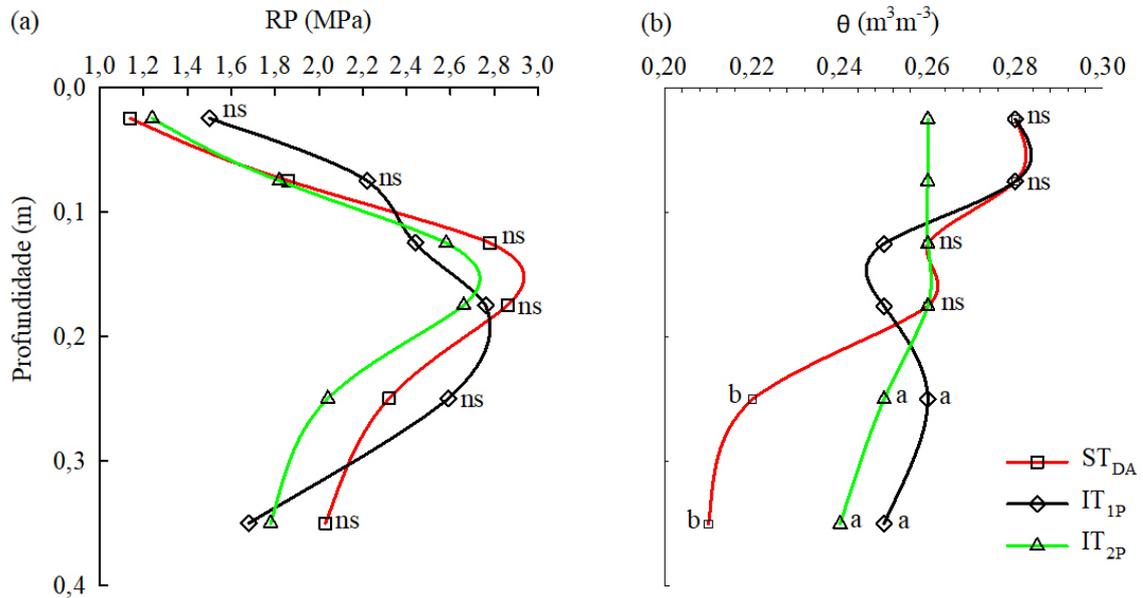


Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

ns = não significativo pelo teste de Tukey (5%).

Fonte: Autora (2019).

Figura 17 – Resistência do solo à penetração (RP) (a) e conteúdo volumétrico de água (θ) (b) ao longo do perfil de solo na situação sem tráfego (ST_{DA}) e com 1 e 2 pivotamentos (IT_{1P} e IT_{2P}) do M113 BR



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

ns = não significativo pelo teste de Tukey (5%).

Fonte: Autora (2019).

6. DISCUSSÃO

6.1 TRÁFEGO DO M113 BR EM LINHA RETA

As evidências indicam que não houve compactação ou a compactação causada pelo M113 BR trafegando em linha reta foi pouco expressiva e só pode ser detectada na Ma da camada superficial (Figura 14). As curvas de Ds e PT com tráfego são praticamente paralelas às curvas de Ds e PT sem tráfego, sugerindo que o padrão de Ds e PT no perfil não foi modificado pelo tráfego. A análise conjunta da magnitude da carga aplicada, resistência do solo à compressibilidade e o amortecimento pela vegetação levam a crer que as diferenças nas propriedades avaliadas devem estar mais associadas à variabilidade da área do que ao efeito do tráfego.

A massa do M113 BR é de aproximadamente 10 Mg, porém a pressão estática que ele aplica ao solo é de apenas 44 kPa. Quando aconteceu o tráfego, o solo não estava suscetível à compactação por cargas dessa magnitude em nenhuma das camadas (Figura 13). Embora a camada superficial (0,00-0,04 m) fosse a mais suscetível à compactação, por estar com Ds baixa

(1,18 a 1,54 Mg m⁻³) e θ alto (0,33 a 0,39 m³ m⁻³) no momento do tráfego (Figura 13), as combinações de Ds com θ aplicadas na equação (1) resultam σ_p entre 63 e 92 kPa, indicando que o solo não sofreria compactação adicional se recebesse carga de 44 kPa.

Nas demais camadas, a condição do solo era mais restritiva ainda à ocorrência de compactação, devido principalmente às maiores Ds (Figura 13). A ocorrência de camadas subsuperficiais com maior Ds é comum em áreas trafegadas (TOLÓN-BECERRA et al., 2012; KELLER et al., 2019), pois nelas os ciclos de umedecimento e secagem e a atividade biológica são menos intensos do que na superfície, onde são mais eficientes para promover descompactação (BEYLICH et al., 2010; SCHJØNNING et al., 2016).

As propriedades medidas na área experimental indicam a presença de camada subsuperficial mais compactada, o que está de acordo com o histórico de tráfego da área. Os perfis de RP (Figura 15) são mais elucidativos que os perfis de Ds, PT e Ma (Figura 14) para indicar que a porção mais compactada do perfil está em torno de 0,15 m de profundidade. Entretanto, nas duas camadas mais profundas, a Ds foi mais alta e o θ mais baixo que na camada superficial (Figura 13). Por isso, a σ_p calculada com a equação (1) variou entre 100 e 133 kPa nessas camadas. Como elas são camadas mais resistentes à compactação, e por terem recebido menos tensões do tráfego que a camada superficial, é improvável que o tráfego do M113 BR na superfície causaria compactação nestas duas camadas subsuperficiais.

Além de a resistência interna do solo limitar sua compressibilidade sob cargas iguais a 44 kPa, a ausência de efeito significativo do tráfego na Ds, PT, Mi, Ks (Figura 14) e RP (Figura 15) também deve ter sido condicionada pela vegetação cobrindo o solo (Figuras 12a, b, c). Resíduos na superfície do solo amorteceram o efeito de pressões aplicadas por equipamentos ou veículos (BALESDENT et al., 2000; 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⁻¹, deve ter amortecido parcela significativa da pressão aplicada na superfície do solo pelo M113 BR. Além disso, a elasticidade do solo na superfície pode ser maior por causa do teor de Corg (BRAIDA et al., 2011), que na camada de 0,00-0,10 m é aproximadamente o dobro do teor de Corg na camada 0,20-0,30 m (Tabela 2).

6.2 TRÁFEGO DO M113 BR EM PIVOTAMENTO

O pivotamento com o M113 BR degradou o solo mesmo sua capacidade de suporte sendo maior que a carga estática aplicada pelo M113 BR. As cargas suportadas pela estrutura do solo sem sofrer compactação nas diferentes camadas onde houve pivotamento são as mesmas

já mencionadas para tráfego em linha reta, pois as parcelas sem tráfego foram as mesmas para os dois estudos. As σ_p na camada superficial indicaram que a estrutura do solo teria capacidade de suportar carga entre 63 e 92 kPa sem sofrer compactação adicional. Entretanto, a aplicação da carga de 44 kPa do M113 BR em pivotamento compactou a camada superficial do solo com apenas um pivotamento (Figura 16). Porém, o segundo pivotamento não incrementou o efeito do primeiro, pois o primeiro tráfego geralmente é o que mais deforma a estrutura do solo (PROSSER et al., 2000; KANE et al., 2013).

Vários fatores contribuíram para que o M113 BR em pivotamento tenha compactado o solo da camada superficial. A camada resistiria cargas estáticas semelhantes às σ_p de 63 e 92 kPa. Em pivotamento há transferência de carga e cisalhamento do solo. Durante o movimento, parte da esteira aplica carga maior que 44 kPa e o cisalhamento do solo resultante da vibração combinada com aumento da força de atrito durante a rotação do M113 BR sobre o solo reduzem sua capacidade de suporte de carga (LI et al., 2007; RETTA et al., 2013).

Essas particularidades do tráfego em pivotamento aplicam ao solo, simultaneamente, força cisalhante e compressiva, cujas consequências não podem ser previstas a partir da análise da σ_p , que indica resistência do solo a cargas estáticas e compressivas. A comparação do aspecto visual da superfície do solo após tráfego (Figura 12) e das propriedades medidas na primeira camada (Figura 14 e 16) ilustram que a carga estática de 44 kPa do M113 BR foi muito mais danosa ao solo quando ele trafegou em pivotamento. A resistência do solo e o amortecimento das cargas pela vegetação compensaram os efeitos de transferência de carga e vibração quando o tráfego foi em linha reta. Contudo, esses fatores não evitaram a compactação do solo com tráfego em pivotamento, corroborando resultado de Ayers (1994).

A diferença de resposta do solo ao modo de tráfego do M113 BR é um alerta importante sobre o risco de prever consequências no solo ao se comparar a σ_p com a carga estática de um equipamento. O progressivo aumento da massa por eixo dos equipamentos nas últimas décadas (KELLER et al., 2019) faz com que a carga estática dos equipamentos se aproxime ou até mesmo supere a σ_p do solo se não houver compensação na área de contato com o solo. Isso aumenta o risco de prever resistência do solo em situações que haverá compactação pelo tráfego. Além disso, estudos recentes destacam que a σ_p frequentemente falha na estimativa da capacidade de suporte do solo (KELLER et al., 2011; DASTJERDI & HEMMAT, 2015; SOMAVILLA et al., 2017; GUBIANI et al., 2018). Portanto, é importante (i) avaliar a aptidão da σ_p para indicar a capacidade de suporte de carga para a camada superficial do solo, na qual a resistência da estrutura do solo é altamente dinâmica, devido a alterações no teor de umidade,

atividade biológica e estado de agregação do solo, e (ii) alertar sobre a interpretação incorreta da σ_p quando as cargas dinâmicas aplicadas pelo tráfego são desconsideradas.

À semelhança dos locais onde ocorreu tráfego em linha reta, os perfis de PR (Figura 17) evidenciam melhor que os perfis de Ds, PT e Ma (Figura 16) que a porção mais compactada do perfil está em torno de 0,15 m de profundidade. Conforme discutido anteriormente, nas duas camadas mais profundas, a σ_p calculada com a equação (1) variou entre 100 e 133 kPa nestas camadas. Por serem camadas que estavam mais resistentes à compactação, terem recebido tensões e vibrações menores e não sofrerem o cisalhamento que aconteceu na superfície, é provável que algumas diferenças associadas ao tráfego (Figura 16), principalmente às da camada mais profunda, decorram da variabilidade da área e não do tráfego do M113 BR.

6.3 POTENCIAIS CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS DECORRENTES DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS MILITARES

A sequência de horizonte A-E-Bt do perfil de solo da área experimental (Figura 8a), com mudança textural abrupta de franco arenosa para franco argilosa (Tabela 1), favorece a ocorrência de erosão superficial e subsuperficial (PEDRON et al., 2012). Além disso, a presença de camada compactada entorno de 0,15 m de profundidade (Figuras 15, 16, 17, 18) e com baixa Ma, reduz a capacidade de infiltração de água no horizonte A, favorecendo a ocorrência de escoamento superficial (SOLGI et al., 2014).

As espécies de gramíneas nativas e espontâneas que ocupam os campos do CISM são resilientes aos danos causados pelo tráfego (YORKS et al., 1997). Por observações visuais feitas quatro meses após o tráfego do M113 BR, houve plena recuperação da vegetação inicialmente danificada (Figura 12), indicando sua adaptação às condições físicas do solo. Por isso, embora a densidade do solo onde aconteceu pivotalmente tenha ficado 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 é um bom indicador de restrição ao crescimento das espécies vegetais que ocupam a área. Pelo mesmo motivo, a Ma menor que $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que é valor considerado crítico (REICHERT et al., 2003), na camada superficial após tráfego (Figura 15c, 17c) também não é um bom indicador. Contudo, mesmo que a vegetação nativa do local seja resiliente, a resiliência das funções do solo no ambiente pode estar sendo comprometida pelo tráfego de veículo militares.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Argissolo do campo de instruções militares resiste às cargas aplicadas pelo Veículo Blindado de Transporte de Pessoal M113 BR quando o tráfego ocorre em linha reta.

Apenas um tráfego em pivotamento do M113 BR degrada o solo, enquanto que três tráfegos em linha reta não modificaram significativamente propriedades da estrutura do solo.

A pressão de preconconsolidação não foi um parâmetro apropriado para avaliar a capacidade de o solo suportar cargas aplicadas por tráfego em pivotamento.

REFERÊNCIAS

- ALAKUKKU, L. Soil Compaction. In: JAKOBSSON, C. (Org.). **Ecosystem Health and Sustainable Agriculture 1** - Sustainable Agriculture. The Baltic University Programme, Uppsala University, p.505, 2012.
- ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, v. 73, p. 145–160, 2003.
- 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, n. 3–4, p. 159–176, 2005.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDERSON, A.B.; PALAZZO, A.J.; AYERS, P.D.; 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, n. 3–4, p. 143–158, 2005.
- ARTHUR, E.; SCHJØNNING, P.; MOLDRUP, P. et al. Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress. **Geoderma**, v. 193–194, p. 236–245, 2013.
- ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. **Soil & Tillage Research**, v. 49, p. 159–170, 1998.
- AYERS, P.D. Environmental damage from tracked vehicle operation. **Journal of Terramechanics**, v. 31, n. 3, p. 173–183, 1994.
- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 215–230, 2000.
- BASTOS, P.R.; HIGUCHI, H. **Novidades na Arma blindada brasileira**. Tecnologia & Defesa, 08 nov. 2016. Disponível em: <<http://tecnodefesa.com.br/novidades-na-arma-blindada-brasileira>>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- BEYLICH, A.; OBERHOLZER, H.; SCHRADER, S. et al. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. **Soil & Tillage Research**, v. 109, p. 133–143, 2010.
- BRAIDA, J.A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A. et al. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo - Volume VII**. Viçosa: SBCS, 2011. p. 221–278.
- BRANDT, A.A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005. 53 p.
- BRAUNACK, M.V. Changes in physical properties of two dry soils during tracked vehicle passage. **Journal of Terramechanics**, v. 23, n. 3–4, p. 141–151, 1986.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions - American Society of Agricultural Engineers**, v. 3, p. 519–524, 1990.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v., p.121-126, 1995.
- CASAGRANDE, A. Determination of the preconsolidation load and its practical significance. **Proceedings of the International Conference on the Soil Mechanics and Foundation Engineering**, p. 60–64, 1936.

- COOKE, G.W. **M113 Armored Personnel Carrier**. Inetres, 03 mai. 2008. Disponível em: <http://www.inetres.com/gp/military/cv/inf/M113.html>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- DALMOLIN, R.S.D; PEDRON, F.A. Solos do município de Santa Maria. **Ciência e Ambiente**, v. 1, p. 59-77, 2009.
- DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part I - Physical and Mineralogical Methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 443–461.
- DASTJERDI, M.S.; HEMMAT, A. Evaluation of load support capacity of remoulded fine and coarse textured soils as affected by wetting and drying cycles. **Soil Research**, v. 53, n. 5, p. 512–521, 2015.
- DIAS, C. **Estudo revela que 30% dos solos do mundo estão degradados**. Embrapa, 12 jul. 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/14343883/estudo-revela-que-30-dos-solos-do-mundo-estao-degradados> Acesso em: 27 set. 2019.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2000. p.55–94.
- FAO; ITPS. **Status of World's Soil Resources (SWSR) - Main Report**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015.
- FEHMI, J.; FARMER, T.; ZIMMERMAN, J. Impacts of Military Vehicle Training Activities on Vegetation: Bibliography With Abstracts. **ERDC/CERL Special Report 01-17**, p. 50, 2001.
- FLORES, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; PAULETTO, E. A. Recuperação da qualidade estrutural, pelo sistema plantio direto, de um Argissolo Vermelho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 8, p. 2164-2172, nov. 2008.
- GARTEN JR, C.T.; ASHWOOD, T.L.; DALE, V.H. Effect of military training on indicators of soil quality at Fort Benning, Georgia. **Ecological Indicators**, v.3, p. 171-179, 2003.
- GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle Size Analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part I - Physical and Mineralogical Methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 383–411.
- GOOGLE LLC. **Google Earth Pro**. Versão 7.3.2.5776 (64-bit). 2019.
- GRAY, A. **BAE Systems and Brazilian Army Complete 100th M113 Upgrade**. BAE Systems, 05 dez. 2014. Disponível em: <https://baesystems.com/en/article/bae-systems-and-brazilian-army-complete-100th-m113-upgrade>. Acesso em: 21 jul. 2019
- GRAY, A. **M113 Upgrades for Brazil**. BAE Systems, 22 dez. 2011. Disponível em: <https://baesystems.com/en/article/m113-upgrades-for-brazil>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- 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.
- GUBIANI, P. I., REINERT, D. J., REICHERT, J. M., GOULART, R. Z.; FONTANELA, E. Excel Add-In To Model The Soil Compression Curve. **Engenharia Agrícola**, n. 37, v. 3, 603-610, 2017.
- HÅKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures**. Uppsala, Sweden: Dept. of Soil Sciences, Division of Soil Management, 2005. 153 p.
- HANSEN, D.J.; OSTLER, W.K. Assessment technique for evaluating military vehicular impacts to vegetation in the Mojave desert. **Journal of Terramechanics**, v. 42, n. 3–4, p. 193–205, 2005.
- HAYDOCK, K.P.; SHAW, N.H. 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.

- HOLF, D.; HADAS, A. Soil Compaction Effects on Cotton Emergence. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural Engineers, v. 27, p. 655–659, 1984.
- HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An Introduction to Geotechnical Engineering**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1981.
- HORN, R.; BLACKWELL, P.S.; WHITE, R. The Effect of Speed of Wheeling on Soil Stresses, Rut Depth and Soil Physical Properties in an Ameliorated Transitional Red-Brown Earth. **Soil & Tillage Research**, v. 13, p. 353–364, 1989.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações automáticas – Santa Maria**. 2019a. Disponível em: <http://inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTgwMw==>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010**. 2019b. Disponível em: <<http://inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 11 nov. 2019.
- IUSS WORKING GROUP WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **World Soil Resources Reports No. 106**. FAO, Rome, 2015.
- IVERSON, R.M.; HINCKLEY, B.S.; WEBB, R.M.; HALLET, B. Physical effects of vehicular disturbance on arid landscapes. **Science**, New Series, v. 212, n. 4497, p. 915–917, 1981.
- KALIAKIN, V.N. Example Problems Related to Compressibility and Settlement of Soils. In: KALIALIN, V.N. (Org.). **Soil Mechanics: Calculations, Principles and Methods**. 1st ed. Butterworth-Heinemann, p. 331-376, 2017.
- KANE, J.R.; AYERS, P.; HOWARD, H. 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.
- KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SCHJONNING, P. et al. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, v. 163, n. 1–2, p. 13–23, 2011.
- KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T. et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil & Tillage Research**, v. 194, 2019.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part I - Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635–662.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of Agricultural Soils from Eight Soil Orders. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 450–457, 1980.
- LEBEDEV, P.A.; SIDOROV, N.G. An investigation into the interaction of a tracklaying vehicle and the ground during a turn. **Journal of Terramechanics**, v. 2, n. 4, p. 9–16, 1965.
- LI, Q.; AYERS, P.D.; ANDERSON, A.B. Effects of Vehicle Speed and Turning Radius of Off-Road Vehicles on Terrain Impact Severity. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 23, n. 6, p. 701–708, 2007.
- MANZATTO, C.V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J.R.R. **Uso Agrícola dos Solos Brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.
- MARCHIORI, J.N.C. A vegetação em Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 38, p. 93–112, 2009.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P. Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v. 37, p. 37–45, 1996.
- MIRANSARI, M.; BAHRAMI, H.A.; REJALI, F. et al. Using arbuscular mycorrhiza to alleviate the stress of soil compaction on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 40, p. 1197–1206, 2008.

- NAWAZ, M.F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 291–309, 2013.
- NELSON, E.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: PAGE, A.L. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part II**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982. p. 539–579.
- NORONHA, J. **Empresa de Santa maria, em parceria com a UFSM, modernizou blindado M-113, que está em uso no 29º BIB**. Blog ForTe, 24 jul. 2013. Disponível em: <<https://forte.jor.br/2013/07/24/a-historia-do-m-113-modernizado-em-santa-maria>>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- OLIVEIRA, R.R. **Projeto M-113Br - Revitalização do M113A2 MK1 no EB**. DefesaNet, 28 ago. 2013. Disponível em: <http://defesanet.com.br/doutrina/noticia/12002/Projeto-M-113Br---Revitalizacao-do-M113A2-MK1-no-EB>>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- PALAZZO, A.J.; JENSEN, K.B.; WALDRON, B.L. et al. Effects of tank tracking on range grasses. **Journal of Terramechanics**, v. 42, p. 177–191, 2005.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 1–9, 2012.
- PROCTOR, R.R. Fundamental Principles of Soil Compaction. **Engineering News-Record**, v. 111, n. 9–13. 1933.
- PROSSER, C.W.; SEDIVEC, K.K.; BARKER, W.T. Tracked vehicle effects on vegetation and soil characteristics. **Journal of Range Management**, v. 53, n. 6, p. 666–670, 2000.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & 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. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo – Volume V**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 49-134.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931–1935, 2006.
- RETTA, A.; WAGNER, L.E.; TATARKO, J. et al. Evaluation of bulk density and vegetation as affected by military vehicle traffic at Fort Riley, Kansas. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 2, p. 653–665, 2013.
- ROSA, D.P. **Relação solo-máquina-planta num Argissolo cultivado e sob campo nativo**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2009. 109 p.
- 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. 2012. 125 p.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.
- SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. rev. ampl. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353 p.
- SANTOS, R.D.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7 ed. Viçosa: SBCS, 2015.
- SARTORI, P. Geologia e geomorfologia de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, v. 39, p. 19–42, 2009.

- SCHJØNNIN, P.; LAMANDÉ, M.; CRÉTIN, V. et al. Upper subsoil pore characteristics and functions as affected by field traffic and freeze–thaw and dry–wet treatments. **Soil Research**, v. 55, n. 3, p. 234–244, 2016.
- 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, 2000.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 113–117, 1997.
- SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, v. 39, p. 276–281, 1958.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th ed. Washington: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014.
- SOLGI, A.; NAJAFI, A.; SADEGHI, S.H. Effects of traffic frequency and skid trail slope on surface runoff and sediment yield. **International Journal of Forest Engineering**, v. 25, n. 2, p. 171–178, 2014.
- SOMAVILLA, A.; GUBIANI, P.I.; REICHERT, J.M. et al. Exploring the correspondence between precompression stress and soil load capacity in soil cores. **Soil & Tillage Research**, v. 169, p. 146–151, 2017.
- STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3 ed., rev. ampl. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2018. 252 p.
- SULLIVAN, P.; ANDERSON, A. A methodology for estimating army training and testing area carrying capacity (ATTACC) vehicle severity factors and local condition factors. **Engineer Research and Development Center TR-00-2**, 2000.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, v. 51, p. 311–321, 2013.
- TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3º ed. Brasília: EMBRAPA, 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.
- TOLÓN-BECERRA, A.; BOTTA, G.F.; LASTRA-BRAVO, X. et al. Subsoil compaction from tractor traffic in an olive (*Olea europea* L.) grove in Almería, Spain. **Soil Use and Management**, v. 28, n. 4, p. 606–613, 2012.
- USDA – U.S. Department of Agriculture. **Soil Quality Resource Concerns: Compaction**. Natural Resources Conservation Service, April 1996.
- VENNIK, K.; KUKK, P.; KREBSTEINA, 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. 186, p. 120–127, 2019.
- WONG, J.Y.; PRESTON-THOMAS, J. **A comparison between a conventional method and an improved method for predicting tracked vehicle performance**. In: Proceedings of the Eighth International Conference on International Society of Terrain-Vehicles Systems, August 5–11, Cambridge, UK, p. 361–380, 1984.
- YORKS, T.P.; WEST, N.E.; MUELLER, R.J. et al. Toleration of Traffic by Vegetation: Life Form Conclusions and Summary Extracts from a Comprehensive Data Base. **Environmental Management**, v. 21, n. 1, p. 121–131, 1997.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DO ARGISSOLO CISM

Descrição Geral

PERFIL: Argissolo CISM.

DATA: 20/02/2019.

CLASSIFICAÇÃO: Argissolo Vermelho-Amarelo Ta Distrófico abrupto

UNIDADE DE MAPEAMENTO: PVA.

LOCALIZAÇÃO: Campo do CISM, coordenadas: 29°43'33.86''S 53°50'12.72''O

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL: Descrito e coletado em trincheira aberta sob campo nativo, no terço superior da coxilha, com 3 a 5% de declive.

ALTITUDE: 90 m.

LITOLOGIA: Rochas sedimentares.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Formação Santa Maria.

CRONOLOGIA: Triássico superior.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Membro Alemoa da Formação Santa Maria.

PEDREGOSIDADE: Não pedregosa.

ROCHOSIDADE: Não rochosa.

RELEVO LOCAL: Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado a ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta estacional semidecidual e savana.

USO ATUAL: Campo nativo com espécies arbustivas.

CLIMA: Cfa, da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: Fabrício Pedron, Beatriz Barbosa, Cândida Muller, Miriam Rodrigues, Douglas Scheid.

Descrição morfológica

- Au** 0 – 3 cm, bruno-acinzentado-escuro (10YR 4,5/2, úmido), franco-arenosa; moderada, média, granular, pequena; friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e abrupta.
- Ap** 3 – 15 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 3,5/6, úmido); franco-arenosa; moderada, média, laminar (compactação); firme, não plástica e não pegajosa; transição plana e clara.
- A1** 15 – 45 cm, bruno-acinzentado (10YR 3/1, úmido); franco-arenosa; moderada, média a pequena, blocos angulares e subangulares; friável, não plástica e não pegajosa a ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- A2** 45 – 70 cm, cinzento muito escuro (10YR 3/2, úmido); franco-arenosa; fraca, média a pequena, blocos subangulares e angulares; não plástica e não pegajosa a ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.

- E** 70 – 90 cm, bruno (10YR 4/3, úmido); franco-arenosa; fraca, média a pequena, blocos angulares e subangulares; friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e abrupta.
- Bt₁** 90-105 cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4, úmido); franco-arenosa; moderada, grande a pequena, blocos subangulares e angulares; não plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- Bt₂** 105-120+ cm, bruno-avermelhado-escuro (5YR 3,5/3,5, úmido); franco-argilosa; moderada a forte, grande a pequena, blocos subangulares e angulares; plástica e pegajosa.

RAÍZES: Muitas no Au e Ap, comuns no A₁ e A₂ e poucas no E, Bt₁ e Bt₂.

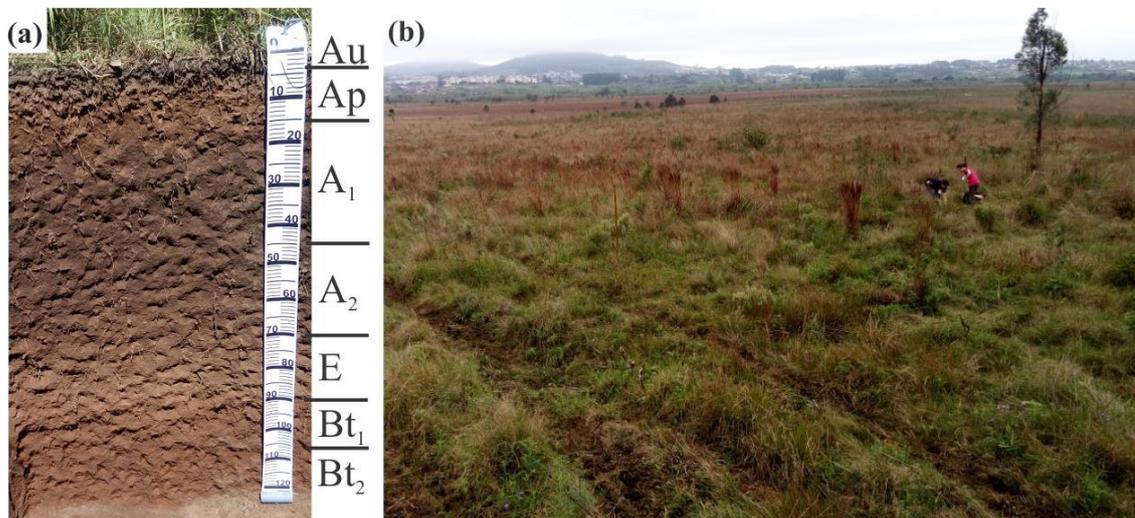
OBSERVAÇÕES:

O horizonte Ap apresenta compactação concentrada na profundidade de 10 a 15 cm.

No horizonte Bt₁ aparecem 2% de plintitas avermelhadas/laranjas de 0,5 a 1 cm de diâmetro.

No horizonte Bt₂ ocorrem 2% de petroplintitas ferruginosas de 1 a 3 mm de diâmetro.

Perfil de solo e paisagem



Análise granulométrica

Horizontes		Fração da amostra total g kg ⁻¹		Composição Granulométrica g kg ⁻¹			Relação Silte/Argila
Símbolo	Profundidade (m)	Calhaus + cascalho	Terra fina (<2mm)	Areia total (2 – 0,05mm)	Silte (0,05 – 0,002mm)	Argila (<0,002mm)	
Au	0,00 – 0,03	0	100	650	255	95	2,68
Ap	0,03 – 0,15	0	100	700	238	62	3,84
A ₁	0,15 – 0,45	0	100	638	256	106	2,42
A ₂	0,45 – 0,70	0	100	612	282	106	2,66
E	0,70 – 0,90	0	100	630	304	66	4,61
Bt ₁	0,90 – 1,05	0	100	551	289	160	1,81
Bt ₂	1,05 – 1,20+	0	100	407	239	354	0,68

Análise química

Horizonte	pH H ₂ O 1:1	Complexo sortivo – cmolc dm ³							Saturação (%)		P Mehlich	K
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Valor S	H+Al	Al ³⁺	CTC pH7	Al	Valor V	mg dm ³	
Au	5	1,9	1,1	0,26	3,26	6,2	0,4	9,5	10,8	34,7	9,5	100,0
Ap	4,3	0,6	0,3	0,07	0,97	10,9	2,1	11,9	67,7	8,5	5,6	28,0
A ₁	4,5	2,2	0,3	0,07	2,57	8,7	1,5	11,2	37,5	22,6	10,6	28,0
A ₂	5	2,1	0,6	0,06	2,76	9,7	0,9	12,5	24,3	22,1	3,4	24,0
E	5	1,0	0,5	0,04	1,54	3,5	0,6	5,0	28,6	30,5	3,0	16,0
Bt ₁	4,8	1,9	1,1	0,09	3,09	6,9	0,6	10,1	15,8	31,5	2,7	36,0
Bt ₂	4,6	2,8	1,7	0,30	4,80	15,4	1,8	20,2	27,3	23,8	1,9	116