

**Thomaz TASSINARI\***

Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, UFLA,  
[thomaztassinari@gmail.com](mailto:thomaztassinari@gmail.com)  
ORCID: 0000-0001-9267-6574

**Gilberto COELHO**

Doutor em Engenharia Agrícola, UFLA,  
[coelho@deg.ufla.br](mailto:coelho@deg.ufla.br)  
ORCID: 0000-0002-0654-2754

**Diego TASSINARI**

Doutor em Ciência do Solo, UFLA,  
[diego.tassinari@yahoo.com.br](mailto:diego.tassinari@yahoo.com.br)  
ORCID: 0000-0003-4701-9668

## **TRILHAS DA SERRA FINA: influência da visitação em atributos físico-hídricos dos solos de duas vertentes da Serra da Mantiqueira**

---

**Resumo:** As trilhas em unidades de conservação, embora desempenhem o papel fundamental de proporcionar o deslocamento para visitação, também são importantes vetores de desequilíbrios e transformações do ambiente que às circundam. O monitoramento da influência do trânsito pedestre em atributos do solo foi avaliado em duas trilhas localizadas em vertentes da Serra Fina, que culmina na Pedra da Mina, pico mais alto da Serra da Mantiqueira e o quarto mais alto do Brasil. Trata-se de um importante *hotspot* da biodiversidade mundial, que engloba relevante porção da mata atlântica, com pronunciada amplitude altitudinal. Com amostras indeformadas de solo colhidas dentro e fora de trilhas, objetivou-se quantificar os efeitos do pisoteio pedestre na alteração da estrutura do solo. Foram encontradas diferenças significativas na densidade do solo, condutividade hidráulica do solo saturado, porosidade total, umidade de saturação e capacidade de campo entre os tratamentos. Foram aplicadas análises de variância, teste de Tukey e uma análise de componentes principais aos resultados para aprofundar a compreensão dos fenômenos. O pisoteio causou compactação em ambos os locais estudados, porém em diferentes níveis. A trilha da Serra Fina apresentou-se mais suscetível às transformações ocasionadas pelo trânsito pedestre que a trilha da Floresta Nacional de Passa Quatro.

**Palavras-chave:** Densidade do solo. Porosidade. Condutividade Hidráulica. Trilha. Ecologia da recreação. Turismo.

## **SERRA FINA TRAILS: visitation influence on hydro physical properties of soils from two slopes of Mantiqueira Mountain Range**

---

**Abstract:** Trails along protected areas, although have the significant role of providing access to remote places, are also responsible for the spreading of impacts that cause transformations on the environment. Monitoring the trampling influence in soil properties was evaluated at two trails, both located at Serra Fina range geological formation, culminating at “Pedra da Mina”, the highest peak of Mantiqueira Mountain Range and the fourth highest in Brazil. An important world biodiversity hotspot that englobes relevant Atlantic Forest portion with pronounced height amplitude. Undeformed soil samples were extracted on trail and right off trail at several locations, thus aiming the quantification of the amount of

damage that trampling leads in soils structure. Significantly differences were detected at bulk density, hydraulic conductivity, soil porosity, soil saturation, saturation moisture and field capacity among the treatments. Variance analysis, Tukey Test and a Principal Components analysis was carried out to provide a phenomenon comprehension. Trampling leads to compaction at both evaluated sites, but at different levels. The *Serra Fina* range trail showed itself more susceptible to the transformations caused by trampling than the National Forest of *Passa Quatro* trail.

**Keywords:** Bulk density. Porosity. Hydraulic conductivity. Trail. Recreation ecology. Tourism.

---

Recebido em: 28/04/2021 - Aprovado em: 14/06/2021 - Disponibilizado em: 31/07/2021

---

## INTRODUÇÃO

Trilhas destinadas ao uso público são importantes vetores de alterações e desequilíbrios ambientais. Quando não há um planejamento do desenho das trilhas e alocação cuidadosa de seu traçado no relevo há maior chance de que processos erosivos e alterações na estrutura do solo se desencadeiem, alterando assim, a dinâmica da água no solo. Monitoramentos de atributos físico-hídricos do solo em unidades de conservação, fornecem dados importantes para serem usados no planejamento dos regimes de uso público, especialmente em locais sujeitos ao crescimento do fluxo de visitantes. A Serra da Mantiqueira, um importante destino do ecoturismo nacional e internacional que experimenta, atualmente, problemas relacionados ao excesso de visitação e à falta de ações mitigadoras de impactos, carece de estudos que evidenciem a natureza e magnitude das alterações causadas pelo trânsito de visitantes.

O bioma Mata Atlântica, que abrange a região de estudo, é considerado um *hotspot* da biodiversidade mundial e também um dos mais ameaçados do Brasil, pela expansão de atividades antrópicas. Sua cobertura atual representa 12,4% da área original. Possui cerca de 33.084 km<sup>2</sup> de áreas protegidas, sendo 35,9% da cobertura atual. Com 20.000 espécies de plantas,

ainda conta com 1.361 espécies de vertebrados que representam 2,1% do total de espécies de vertebrados do mundo (MYERS et al., 2000).

A Floresta Nacional de Passa Quatro (FLONA), unidade de conservação federal, portanto, vinculada ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, está inserida no Bioma Mata Atlântica. Nessa unidade de conservação encontram-se áreas de florestas nativas, além de reflorestamento com os gêneros *Pinus* sp., *Eucaliptus* sp. e *Araucaria* sp. em que são realizados tratamentos silviculturais visando à conservação dos sub-bosques. A gestão da FLONA incentiva a visitação controlada nas trilhas contando ainda com outros atrativos para visitantes e desde 2017 recebe eventos esportivos desde que seus organizadores cumpram determinadas condicionantes.

A Área de Preservação Ambiental da Serra da Mantiqueira (APASM), estabelecida pelo Decreto Federal nº 91.304/85, de 03 de junho de 1985, abrange uma área de 437.192,11 ha ao longo de 27 municípios dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. Entre as diversas fisionomias vegetais observadas no território da APASM, destacam-se os Campos de Altitude, Florestas em estágios avançado e médio de regeneração, afloramentos rochosos e zonas ripárias

pelos elevados índices de diversidade biológica.

O Maciço da Serra Fina, formação geomorfológica inserida na APASM, abrange áreas com elevado interesse para conservação. Ao longo do relevo montanhoso são encontrados campos de altitude além de florestas ombrófilas densas e mistas com presença expressiva da *Araucaria angustifolia* dominando o dossel superior das matas.

Nas porções mais elevadas da APASM, a visitação desordenada representa uma ameaça constante à conservação da fauna, flora, solo e recursos hídricos fazendo surgir a necessidade de estudos cujos dados gerados possam servir de ferramenta para os gestores das UCs em questão implementarem ações mitigatórias visando a visitação de mínimo impacto possível.

Há necessidade de gestores, assessorados por corpo técnico adequado, selecionarem e implementarem uma ou mais ações corretivas ou mitigatórias, sendo o principal objetivo gerencial determinar qual ação será a mais efetiva para cada situação (MARION; FARREL, 2002), levando em conta os recursos disponíveis na UC para implementar ações dessa natureza.

A recreação é uma das raras ameaças ao ambiente cujos impactos podem ser medidos diretamente,

comparando-se com locais próximos e não perturbados (COLE, 2006). Ao comparar atributos observados em locais preservados com os de um local com algum grau de distúrbio, próximos, como ao longo de trilhas consolidadas, é possível estimar mudanças decorrentes da visitação (COLE; MONZ, 2004). O monitoramento de atributos de solo em unidades de conservação pode fornecer sustentação ao planejamento da visitação e à implementação de práticas de manejo conservacionista das trilhas. Tais intervenções melhoram a qualidade e atratividade da experiência de visitação, além de minimizar os impactos negativos das interações das pessoas com as trilhas.

A gestão de unidades de conservação deve integrar além de aspectos ecológicos, também aspectos socioculturais e econômicos, para que se obtenha melhores resultados. Hammit et al. (2015) salientaram que gestores não podem simplesmente aceitar que todos os impactos seguem uma resposta linear à quantidade de visitantes que acessam as U.Cs.

Marion; Farrel (2002) salientaram a importância de estudos adaptativos de suporte à gestão, em que cientistas de diversas áreas possam assessorar gestores de unidades de conservação no monitoramento das condições ambientais e na avaliação ao longo do tempo das medidas de mitigação de impacto

implantadas. Porém, tais estudos devem ter caráter local e aplicabilidade prática para que se consiga amortizar os impactos de uma crescente visitação em certas unidades de conservação.

O trânsito de pedestres por trilhas, ao remover paulatinamente a cobertura vegetal morta da superfície, expõe o solo mineral ao contato com os pés, causando efeitos deletérios à estrutura. Liddle; Greg-Smith (1975) notoriamente, quantificaram os efeitos de passagens de pedestres em um trecho de trilha no País de Gales e concluíram que em curto prazo ocorre um aumento linear da densidade do solo com o número de passagens, sendo que a compactação é transmitida a maiores profundidades ao longo do tempo. Entretanto, em trechos declivosos com solos expostos, como ocorre em diversas seções da trilha da Serra Fina, pode haver um decréscimo de densidade do solo no leito ao longo do tempo. Isso pode ocorrer em decorrência da erosão ativa e perda de sedimentos, que resulta no aprofundamento da superfície (DELUCA et al., 1988).

Conduzindo ampla revisão bibliográfica, Ballantyne; Pickering (2015) computaram resultados de 59 trabalhos em que impactos da visitação em solos e vegetação foram avaliados. Desses, 12 trabalhos trataram do tema “compactação” e quatro compararam esse atributo com áreas adjacentes às trilhas em questão. Três

destes relataram variação negativa da compactação com o distanciamento em relação ao leito das trilhas.

Embora a densidade do solo seja amplamente utilizada como um indicativo de compactação, valores naturalmente altos em decorrência da textura e dos materiais de origem podem sugerir erroneamente a ocorrência de compactação. Devido à limitação da densidade do solo como indicativo de alterações na estrutura do solo, Stolf et al. (2011), sugerem que a macroporosidade seja utilizada como parâmetro.

A compactação em áreas sujeitas a secas reduz ainda mais a umidade nos períodos de estiagem e induz processos anaeróbicos em solos hidromórficos, ou sujeitos ao encharcamento durante períodos do ano (LIDDLE; GREIG SMITH, 1975), tornando o solo um ambiente menos atrativo ao desenvolvimento vegetal macro e microbiótico ao longo de trilhas e ao redor de áreas de acampamento.

No presente trabalho teve-se por objetivo avaliar atributos físico-hídricos do solo ao longo um trecho de crista da Serra Fina, e outro na Floresta Nacional de Passa Quatro, verificando os efeitos do pisoteio ocasionado pela crescente visitação a que essas unidades de conservação (U.C.) estão sujeitas.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo e amostragem

A pesquisa foi conduzida ao longo da trilha da Serra Fina (SF), inserida na Área de Preservação Ambiental da Serra da Mantiqueira (APASM) e em uma trilha na Floresta Nacional de Passa Quatro (FLONA). As altitudes dos pontos amostrais na SF variaram de 2078 m a 2456 m e na FLONA, de 1257 m a 1326 m.

A trilha da FLONA tem um histórico de uso, principalmente por funcionários da U.C., que a utilizam para acessar os pontos mais altos do acieiro da unidade. Porém, em 2017, para eventos de corrida de pedestres as trilhas foram utilizadas para o trânsito de cerca de 300 atletas.

A trilha da Serra Fina também percorre as divisas entre os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. Parte do trecho abrangido pela pesquisa se localiza nos limites da RPPN Instituto Alto Montana da Serra Fina (RPPNIAM), instituição que serviu de base para os pesquisadores envolvidos no estudo, devido à localização e acessos privilegiados às porções mais altas da Serra da Mantiqueira. Essa trilha tem experimentado um crescimento expressivo na quantidade de visitantes nos últimos anos. Registros obtidos a partir dos livros sobre o cume da

Pedra da Mina apontam que de 2001 a 2017, a quantidade de registros aumentou 398%. Esses levantamentos são realizados e tabulados por montanhistas do município de Passa Quatro e Itanhandu (ambos em Minas Gerais), de forma conjunta com gestores da APASM e até o momento não foram publicados.

A região apresenta clima subtropical, sem estação seca e com verão temperado, *Cfb* na classificação de Köppen (ALVARES, et al., 2004), com temperatura média do mês mais quente menor que 22 °C e menos que quatro meses com a temperatura média acima de 10 °C. Com relação à distribuição de solos, foram identificadas ocorrências de argissolo vermelho amarelo aluminico típico, cambissolo háplico aluminico típico, depósitos colúvio aluvionares, latossolo vermelho amarelo aluvionar, neossolo litólico, neossolo regolítico e organossolo histórico. Ambas as unidades de conservação se encontram inseridas no Bioma Mata Atlântica. Entretanto, o território da FLONA sofreu mais interferências antrópicas, principalmente em decorrência da silvicultura (ICMBIO, 2009). A vegetação do Maciço da Serra Fina, sendo composta por florestas ombrófilas densa e mista, incluindo a restrita fisionomia altimontana, matas de araucárias e campos de altitude com alto grau de endemismo apresenta grande sensibilidade e grande valor para a

conservação da biodiversidade e dos recursos hídricos (ICMBIO; DETZEL CONSULTING, 2018).

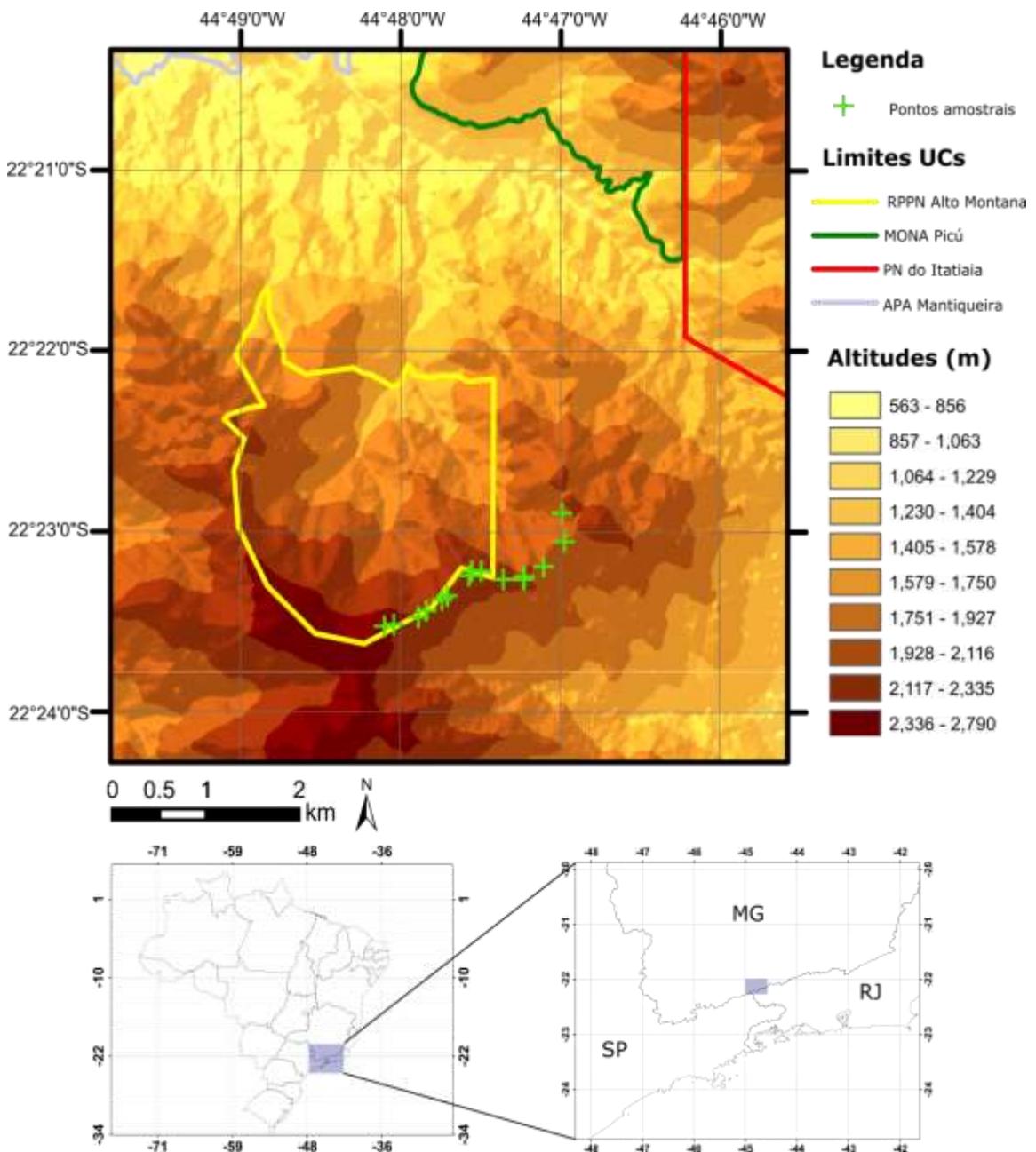
O teor de matéria orgânica, estrutura do solo, volume e distribuição dimensional de poros e densidade afetam de diferentes maneiras as propriedades hidráulicas do solo, como umidade de saturação, condutividade hidráulica, capacidade de campo e retenção hídrica. Essas propriedades regem os fenômenos de transporte de água e solutos em meios porosos, fenômenos importantes para a recarga dos aquíferos e para manutenção do ciclo hidrológico.

A Serra Fina ainda, bem como o proeminente Planalto do Itatiaia, devido às elevadas altitudes das cristas, apresenta, como particularidade hidrológica, ciclos de congelamento ao longo do ano, especialmente durante o inverno. Durante vários dias do ano ocorrem temperaturas negativas nas porções elevadas da serra em faces sujeitas a menores ou tardias incidências de radiação solar.

O mapa ilustrado na Figura 1 representa o acentuado gradiente de altitude da região estudada. A imagem foi produzida a partir de um modelo digital de terreno gerado pelo sensor PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) levado a bordo do satélite ALOS (Advanced Land Observation Satellite), também conhecido por Daichi,

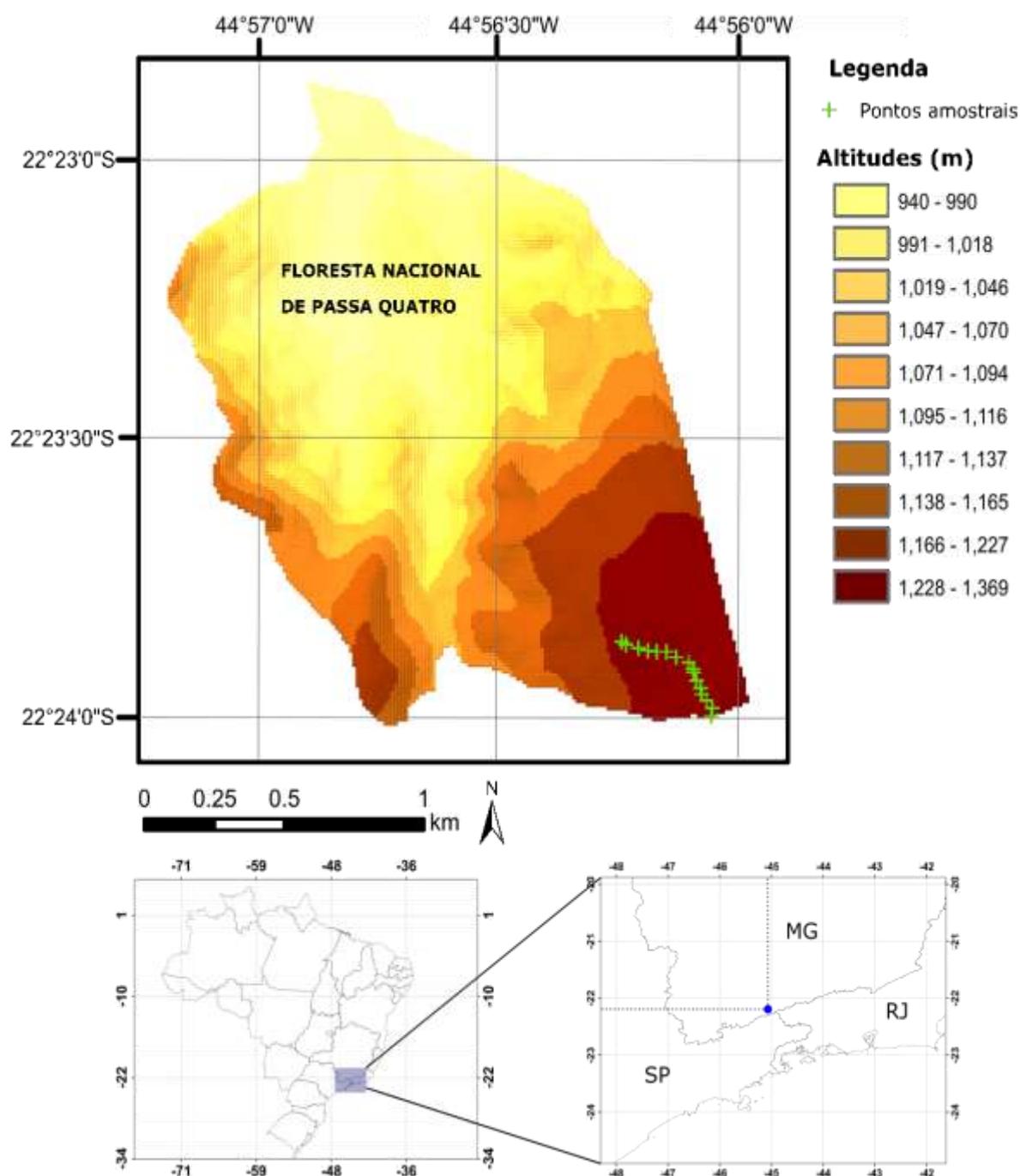
sendo uma missão conduzida de forma conjunta pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) e Organização de Sistemas de Observação de Recursos do Japão (Japan Resources Observation Systems Organization (JAROS)) (ROSENQVIST; SHIMADA, 2004), apresenta resolução espacial de 12,5 m x 12,5 m.

**Figura 1** – Localização relativa entre a área de estudo Serra Fina sobre modelo digital de terreno utilizado



Fonte: autores.

**Figura 2** – Localização relativa entre a área de estudo FLONA sobre modelo digital de terreno utilizado



Fonte: autores.

## Caracterização do solo

Foram realizadas amostragens de solo em 14 pontos ao longo da Trilha da Serra Fina, inserida na Área de Preservação Ambiental da Serra da Mantiqueira e 10 pontos em uma trilha da Floresta Nacional de Passa Quatro.

Em cada ponto foi coletado um par de amostras indeformadas com amostrador de *Uhland*, sendo uma amostra extraída diretamente do leito da trilha e uma fora, para que fossem avaliados os efeitos do pisoteio pedestre em atributos físicos do solo. Os cilindros utilizados para acondicionar as amostras foram de PVC com diâmetro médio de 6,57 cm e altura média de 8,20 cm.

No Laboratório de Física do Solo do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras foram quantificados os seguintes atributos: massa específica do solo ( $D_s$ ), pelo método gravimétrico em estufa, massa específica de partículas ( $D_p$ ), pelo método do balão volumétrico, condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) com permeâmetro de carga constante, porosidade total ( $P$ ), macroporosidade ( $MaP$ ), microporosidade ( $MiP$ ) com a mesa de tensão a 6 kPa ou 60 cm (TEIXEIRA et al, 2017).

## Análises estatísticas

Foram aplicadas análises de variâncias disponíveis no pacote estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020) para verificar tendências de ocorrências entre os tratamentos.

Com os valores médios dos tratamentos foi aplicado o Teste de médias Tukey com nível de significância de 5%.

Com os dados obtidos foi conduzida, ainda, uma Análise de Componentes Principais (PCA) também no pacote R, considerando como tratamentos: FLONA, Serra Fina (SF), FLONA na trilha, FLONA fora da trilha, Serra Fina na trilha (SF trilha) e Serra Fina fora da trilha (SF fora). A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica multivariada em que observações são aglutinadas ao longo de eixos por uma série de variáveis inter-relacionadas (ABDI; WILLIAMS, 2010). Seu objetivo é extrair informações importantes representando os dados como um par de novas variáveis ortogonais denominadas componentes principais. Essa operação reduz a grande dimensionalidade e colinearidade dos dados e comprime toda a variância em dois eixos de componentes principais (HARTERMINK; MINASNY, 2016).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelos resultados representados na tabela 1, não foi detectada diferença significativa entre os tratamentos nem de suas interações na densidade do solo. A heterogeneidade do material amostrado, com presença ora de rochas, ora de grandes macroporos, com origens morfológicas diversas, fez com que os efeitos da compactação não fossem detectados nessa análise. Um desdobramento da elevada variabilidade dos resultados é a alta proporção da soma de quadrados retida no resíduo. Os efeitos do pisoteio, entretanto, ficaram evidentes nos outros atributos físico-hídricos analisados.

A tabela 2 demonstra que na FLONA, a densidade do solo na trilha foi, em média,  $0,01 \text{ g.cm}^{-3}$  maior que fora da trilha, enquanto na Serra Fina essa diferença foi de  $0,02 \text{ g.cm}^{-3}$ , sendo essa elevação insignificante. Na literatura encontra-se valores de elevação de  $0,3 \text{ g.cm}^{-3}$  (CRAWFORD; MIDDLE, 1977) . Embora a heterogeneidade do solo amostrado possa ter mascarado tendências sensíveis de alteração de densidade, pode-se concluir que a abundante cobertura vegetal teve um efeito protetivo à compactação na trilha.

**Tabela 1** – Proporção da soma de quadrados (SQ) retida em cada fonte de variação (FV) para densidade do solo (ds), porosidade total (poros), macroporosidade (macro), microporosidade (micro) e condutividade hidráulica do solo saturado (ksat)

FV	ds	poros	macro	micro	ksat
local	0.06	0.29 *	0.03	0.29 *	0.14 *
posição	0.03	$5 \cdot 10^{-3}$	0.13 *	0.06 *	0.11 *
local*posição	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$	0.06 *	0.05 *	0.05
resíduo	0.94	0.70	0.80	0.60	0.70

Valores significativos são seguidos por “\* ”.

Com base na Tabela 1, os atributos porosidade total, microporosidade e condutividade hidráulica apresentaram diferenças significativas para o tratamento local evidenciando o efeito dos diferentes

estágios de pedogênese a que estão submetidos os locais de estudo.

Ainda com base na Tabela 1, observa-se que os atributos macroporosidade, microporosidade e condutividade hidráulica foram

influenciados significativamente pelo trânsito pedestre, apresentado diferenças para o tratamento posição. Esse resultado sugere que as alterações causadas pelo pisoteio na estrutura e dinâmica da água no solo são significativas ao longo das trilhas estudadas. Essas diferenças são evidenciadas na Tabela 2 a seguir.

A interação entre os fatores também levou a diferenças significativas em relação aos atributos macro e microporosidade. Conclui-se que os impactos do pisoteio pedestre na estrutura e dinâmica da água são influenciadas pelo grau de desenvolvimento do solo.

**Tabela 2** – Resultado do Teste de Tukey, com 5% de significância para médias de atributos do solo e fontes de variação

Local	Posição	ds (g/cm <sup>3</sup> )	poros (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	macro (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	micro (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	ksat (cm/s)
FLONA	Trilha	0.74 Aa	0.61 Ab	0.18 Ba	0.43 Aa	0.0295 Bb
	Fora	0.73 Aa	0.58 Aa	0.25 Aa	0.33 Aa	0.0666 Aa
SF	Trilha	0.66 Aa	0.68 Ba	0.18 Ba	0.51 Aa	0.0157 Ab
	Fora	0.64 Aa	0.69 Aa	0.19 Ab	0.50 Ba	0.0228 Ab

Valores seguidos por letras maiúsculas diferentes diferem entre si, rejeitando a hipótese de nulidade para a fonte de variação "Local" pelo teste de Tukey com 5% de significância. Valores seguidos por letras minúsculas diferentes diferem entre si, rejeitando a hipótese de nulidade para a fonte de variação "Posição" pelo teste de Tukey com 5% de significância.

O teste Tukey a 5% não indica diferença significativa de densidade do solo dentro e fora da trilha na Serra Fina. O aumento significativo de densidade, também não foi detectado na FLONA pelo teste. A grande variabilidade de composição das amostras pode ter levado a esse resultado, tendo em vista a presença de fragmentos de rochas e macroporos de dimensões e origens morfológicas diversas, como galerias formadas a partir da decomposição de raízes, caminhos escavados por animais ou vazios decorrentes da solubilização de minerais.

A densidade do solo é um atributo que, por definição, é alterada pela compactação, concomitantemente à redução

de volume de macroporos. Porém, a detecção desse efeito não foi possível pelo teste estatístico conduzido.

A porosidade total apresentou-se significativamente menor na trilha da Serra Fina do que fora sugerindo efeito de modificação da estrutura do solo.

Observa-se claramente o efeito do trânsito pedestre na conversão de macroporos em microporos, sugerindo compactação, ainda que o teste não tenha detectado diferença significativa de densidade em decorrência da grande variabilidade desse atributo. Mesmo no leito das trilhas estudadas o volume de macroporos foi, em média, 80% maior

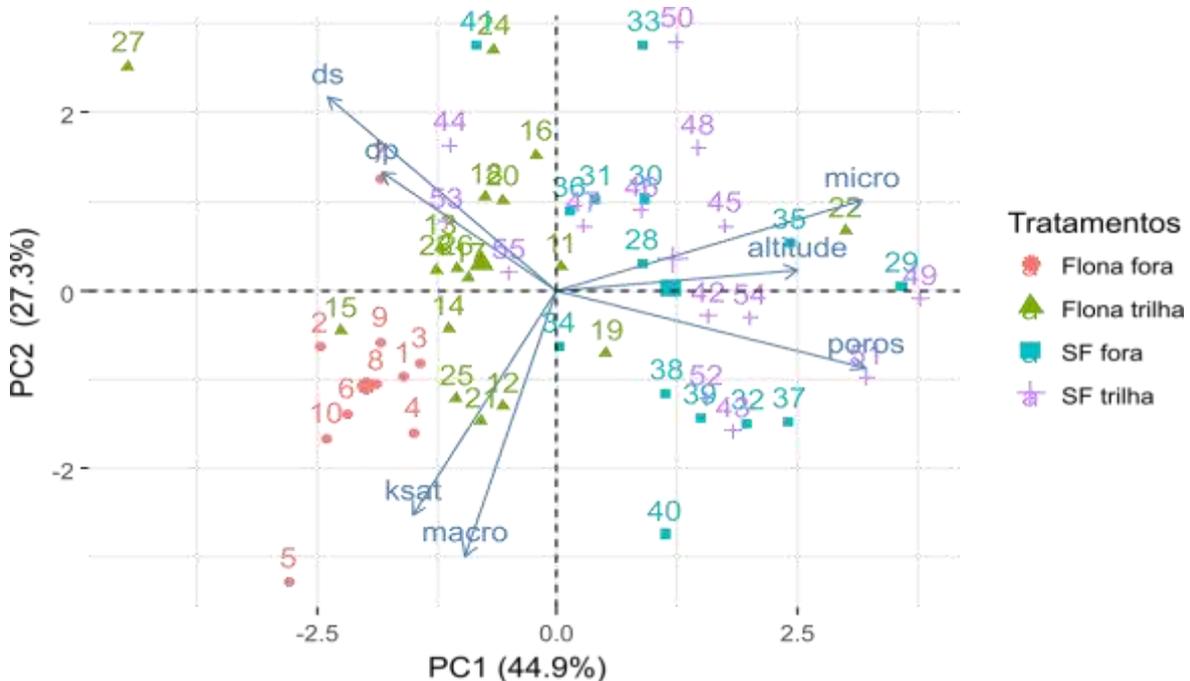
que o valor crítico de  $10 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$  indicado por Hakansson; Lipiec (2000), como valor crítico para aeração do solo e infiltração, sugerindo que a compactação promovida por pedestres, pelo menos ainda, não foi o suficiente, para que sérios distúrbios na dinâmica da água no solo sejam desencadeados na região de estudo.

A variabilidade da densidade em ambos os locais tem origem na presença de fragmentos de rochas e grandes macroporos, de origens morfológicas diversas, presentes nos solos amostrados.

A FLONA apresentou valores mais altos de  $k_{sat}$  fora da trilha, corroborando a hipótese de modificação da estrutura do solo.

Foram detectados fora da trilha da Serra Fina, valores significativamente maiores de porosidade total que os obtidos na trilha, sugerindo compactação e corroborando com os valores de  $k_{sat}$ .

**Figura 3** – Resultado gráfico da Análise de Componentes Principais (PCA) para altitude, densidade do solo (ds), porosidade total (poros), macroporosidade (macro), microporosidade (micro) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $k_{sat}$ ) para as fontes de variação “Local” (Serra Fina e FLONA) e “Posição” (trilha e fora)



Fonte: autores.

Os eixos ortogonais de componentes principais (PC1 e PC2)

condensam respectivamente 44,9% e 27,3% de toda variação dos dados, agrupando as variáveis respostas.

Os valores de *ksat* apresentaram proporcionalidade inversa com a altitude, sugerindo maiores condutividades nas porções mais baixas do relevo. Isso ocorre devido à estruturação e maiores porosidades dos solos mais desenvolvidos da FLONA.

Como esperado, existe uma forte relação entre *ksat* e a macroporosidade. Isso pode ser observado no gráfico pela proximidade entre os eixos dessas variáveis.

A densidade do solo (*ds*) e a densidade de partículas estão fortemente relacionadas, sugerindo que, mesmo havendo compactação e modificação da estrutura do solo, o material de origem é determinante para o valor de *ds*.

A concentração de pontos da FLONA no sentido do eixo de *ksat* é explicado pela grande porosidade dos solos florestais do local. O ponto 5, particularmente, apresentou *ksat* muito mais elevado, podendo ser explicado pela ocorrência de grandes macroporos, provavelmente originados das atividades de fauna e flora no solo. As amostras colhidas fora da trilha apresentaram maiores valores de *ksat* que as de dentro da trilha, demonstrando que o pisoteio e trânsito de visitantes e funcionários da unidade leva a uma redução da porosidade

drenável do solo localmente ao longo do leito da trilha.

Os resultados apontam para um decaimento da macroporosidade do solo, acompanhado por um aumento da microporosidade em decorrência do pisoteio. A transformação dos macroporos em microporos e a consequente diminuição da condutividade hidráulica são efeitos relacionados à compactação. Na FLONA esse efeito foi mais evidente, mostrando maior suscetibilidade desses solos ao pisoteio. Entretanto, embora os solos da Serra Fina tenham se apresentado mais resilientes à compactação, a vegetação, em grande parte endêmica, desse local se mostra muito mais sensível e com mais lenta regeneração se comparada com a da FLONA.

Os solos da Serra Fina apresentaram valores de microporosidade mais elevados que os da FLONA de maneira geral. As amostras colhidas na trilha apresentaram microporosidade ainda maiores que as de fora da trilha.

Os dados da Serra Fina apresentaram grande variabilidade ao longo do eixo horizontal. Amostras da trilha apresentaram valores mais altos de densidade do solo e tiveram grandes variações de porosidade total, macroporosidade e microporosidade, além de um espectro mais amplo de altitudes que as amostras da FLONA.

A homogeneidade dos dados da FLONA válida a metodologia empregada de maneira geral. nas análises de todos os atributos. A grande variabilidade dos dados da Serra Fina tem origem nas diferenças de ambientes do local.

## CONCLUSÕES

Os resultados apontaram transformações decorrentes do pisoteio, principalmente na distribuição dimensional dos poros e na condutividade hidráulica do solo saturado.

Foi possível a detecção do efeito de compactação somente pelos atributos relacionados à porosidade, tendo a

densidade do solo se mostrado um indicativo ineficaz para monitorar os efeitos da compactação em solos com certo grau de heterogeneidade.

A cobertura vegetal morta, quando consolidada, favorece a morfologia de macroporos, indispensáveis à infiltração de água e impõe resistência ao escoamento superficial em decorrência do aumento de rugosidade do leito. Ainda, oferece um efeito protetivo e mitigatório à compactação e ao deslocamento de sedimentos.

## REFERÊNCIAS

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analyses. Wiley Interdisciplinary. **Reviews: Computational Statistics**, v.2, p. 433-459, 2010.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p 711-28, 2014.

BALLANTYNE, M.; PICKERING, C. M. The impacts of trail infrastructure on vegetation and soils: current literature and future directions. **Journal of Environmental Management**, v. 164 p.53–64, 2015.

COLE, D. N. **Visitor Impact Monitoring**. The George Write Forum. 2006.

COLE, D. N.; MONZ, C. A. Spatial patterns of recreation impact on experimental campsites. **Journal of Environmental Management**, v. 70, p. 73-84, 2004.

CRAWFORD, A. K., MIDDLE, M. J. **The effect of trampling on neutral grassland**. Biological Conservation, v.12, p. 135-142, 1977.

DELUCA, T. H.; FREIMUND, W. A.; COLE, D. N. Influence of llamas, horses, and hikers on soil erosion from established

recreation trails in western Montana, USA. **Environmental Management**, v. 22, p. 255-62, 1998.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Tillage Research**, v. 53, p. 71-85, 2000.

HAMMIT, W. E.; COLE, D. N.; MONZ, C. A. **Wildland recreation: ecology and management**. Hoboken: Wiley Blackwell, 2015.

HARTERMINK, A.; MINASNY, B. Digital soil morphometrics. **Progress in soil science**. Springer, 2016.

ICMBIO; DETZEL CONSULTING. **Plano de Manejo da Área de Preservação Ambiental da Serra da Mantiqueira**. Curitiba: APASM, 2018.

ICMBIO. **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Passa Quatro**. Brasília: MMA, 2009.

LIDDLE, M. J.; GREIG-SMITH, P. A survey of tracks and paths in a sand dune ecosystem soils. **The Journal of Applied Ecology**, v. 12, p. 893, 1975.

MARION, J. L.; FARREL, J. T. Management practices that concentrate visitor activities: camping impact management at Isle Royale. **Journal of Environmental Management**, v. 66 p. 201-22, 2002.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403 p. 843-58, 2000.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing. 2020.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M. ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts. **4th International Symposium on Retrieval of Bio and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications**. Austria, November, p. 16-19, 2004.

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

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, EMBRAPA, p. 574, 2017.