

IMPACTO DA SUBSTITUIÇÃO DE PASTAGEM EXTENSIVA POR EUCALIPTO NOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO NO DOMÍNIO DA MATA ATLÂNTICA

Lunalda Aparecida Vaz Pola

Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil
polalunalda@gmail.com

Roberto Avelino Cecílio

Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil
roberto.cecilio@ufes.br

Otacilio José Passos Rangel

Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Alegre, Alegre, ES, Brasil
otaciliorangel@gmail.com

Sidney Sara Zanetti

Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil
sszanetti@yahoo.com.br

Lucas José Teodoro Lobato

Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil
lucaslobato17@hotmail.com

RESUMO

A mudança de uso da terra tem potencial de alterar as características físicas do solo e sua capacidade de infiltração. O objetivo desse estudo foi avaliar as diferenças entre os atributos físico-hídricos de um solo sob cultivo de eucalipto (5 anos de idade) em relação ao seu uso anterior de pastagem extensiva. O estudo foi conduzido no Instituto Federal do Espírito Santo, em Alegre – ES. Em cada área, conduziram-se ensaios de infiltração de água no solo em nove pontos distribuídos de forma sistemática. A amostragem de solo foi realizada nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm em três pontos em torno de cada ensaio de infiltração. Os atributos avaliados foram a taxa de infiltração estável (Tie), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macro (Ma) e microporosidade (Mi), granulometria, carbono orgânico total (COT) e resistência a penetração (RP). Não houve diferença significativa para a Tie e COT entre os usos. A área sob povoamento de eucalipto apresentou maiores valores de Ds na camada de 0-10 cm, e menores valores de Pt e Mi para as três camadas. Para o manejo empregado, o período de cinco anos da cultura florestal não foi suficiente para melhorar a qualidade física do solo.

Palavras-chave: Infiltração. Qualidade do solo. Mudança de uso da terra.

IMPACT OF REPLACING EXTENSIVE PASTURE WITH EUCALYPTUS ON SOIL PHYSICAL-WATER ATTRIBUTES IN THE ATLANTIC FOREST AREA

ABSTRACT

Land use change has the potential to alter soil physical attributes and its infiltration capacity. The objective of this study was to evaluate the differences in physical-hydric attributes of soil under eucalyptus cultivation (5 years old) compared to its previous use of extensive pasture. The study was conducted at the Federal Institute of Espírito Santo, in Alegre - ES, Brazil. In each area, water infiltration tests were conducted at nine systematically distributed points. Soil sampling was carried out at layers of 0-10, 10-20, and 20-40 cm at three points around each infiltration test. The evaluated attributes were stable infiltration rate (Tie), soil density (Ds), total porosity (Pt), macro (Ma) and microporosity (Mi), particle size distribution, total organic carbon (COT), and penetration resistance (RP). There was no significant difference for Tie and COT between land uses. The area under eucalyptus plantation presented higher values of Ds at a layer of 0-10 cm and lower values of Pt and Mi for all three layers. For the management employed, the five-year period of forest cultivation was not sufficient to improve the soil physical quality.

Keywords: Infiltration. Soil quality. Change of land use.

INTRODUÇÃO

À medida que crescem os desafios relacionados às mudanças climáticas, compreender os impactos da mudança de uso da terra nos atributos físico-hídricos do solo torna-se vital. No Brasil, a mudança de uso da terra e a agropecuária juntas representam 75% das emissões de gases de efeito estufa (Tsai et al., 2023). Nesse cenário, o *Sixth Assessment Report* (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destaca a restauração, a proteção e manejo sustentável de áreas naturais, e as práticas agrícolas mais sustentáveis, com integração de indivíduos arbóreos às áreas de cultivo, como medidas mitigadoras de adaptação às mudanças do clima (Bohem; Schumer, 2023). Todas essas medidas estão relacionadas com a melhoria da qualidade do solo.

A qualidade física do solo é relacionada com sua capacidade de permitir a infiltração, o armazenamento e a disponibilização de água, à sua resistência a degradação, à resposta ao manejo empregado e sua produtividade (Reichert; Reinert; Braida, 2003). O manejo inadequado do solo, com ausência ou pouca cobertura, acarreta a redução da capacidade produtiva, decorrente da redução da capacidade de infiltração e armazenamento de água, aumento do fluxo superficial e perdas de água e nutrientes por processos erosivos (Basset et al., 2023). Comumente, solos com pastagens degradadas apresentam elevada densidade, redução da porosidade, em especial os macroporos, e redução na permeabilidade da água, decorrentes do intenso pisoteio animal (Bezerra et al., 2019; Gomes; Marciano; Faustino, 2018; Torres; Fabian; Pereira, 2011).

No Brasil, as pastagens ocupam uma área de aproximadamente 177.294.874 hectares, correspondendo a 20,87% do território nacional. Dessa área, cerca de 61,8% apresentam degradação intermediária a severa (LAPIG/UFG, 2021). Segundo estes dados, para o domínio da Mata Atlântica, as pastagens somam 32.442.889 hectares, dos quais 68,4% estão degradados. Nesse contexto, a conversão desses espaços em usos mais sustentáveis, quer seja pela restauração, pela implantação de sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), pela silvicultura ou até para pastagens manejadas, é uma das formas de aperfeiçoar o uso do solo e da água, em busca de uma adaptação ao cenário climático atual (Penna; Fernandes; Pereira, 2023; Sá et al., 2023).

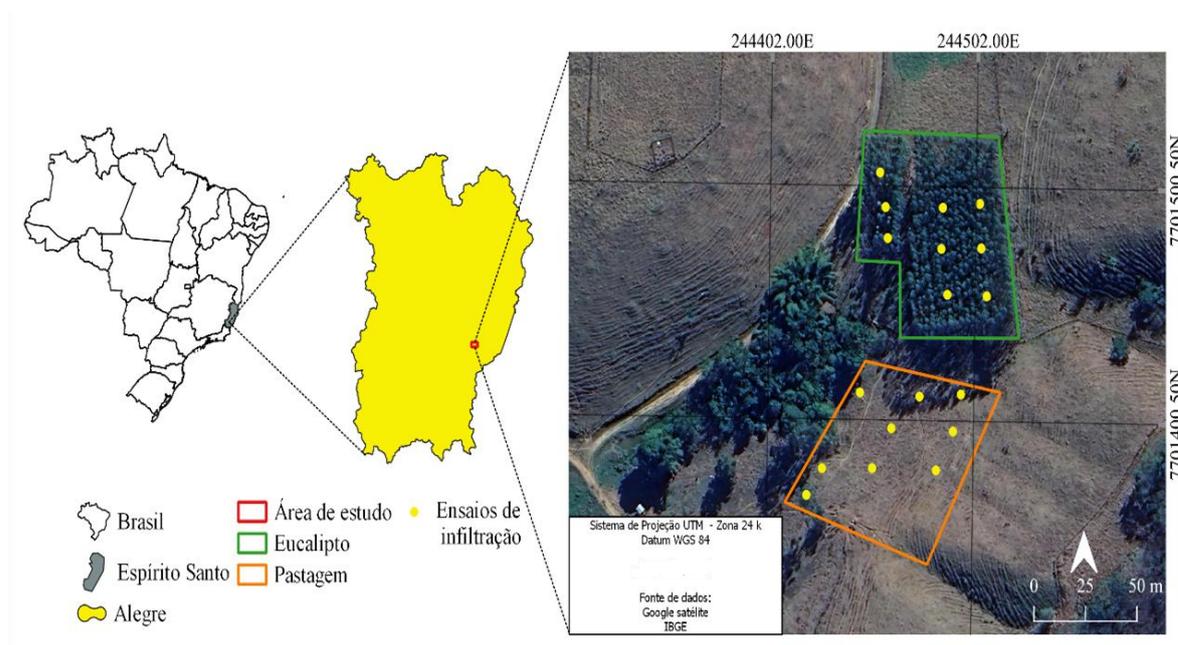
O plantio de espécies florestais, principalmente espécies do gênero *Eucalyptus*, vem crescendo no país. Segundo os últimos relatórios da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), em 2023, a área cultivada com eucalipto era de 7,6 milhões de hectares, em que grande parte dessas áreas estavam degradadas anteriormente (IBÁ, 2022, 2023). Em relação a ambientes florestais, sabe-se que a vegetação nativa, em geral apresenta solos bem estruturados, com alto teor de matéria orgânica que promove a agregação, com relação equilibrada de macro e microporosidade e densidade do solo menor (Rocha et al., 2016; Santana et al., 2023; Sun et al., 2018). A presença de indivíduos arbóreos contribui para o aumento do fluxo preferencial da água, por meio do sistema radicular que modifica e aumenta a conexão dos poros (Bengough, 2012). Já em relação a plantios florestais comerciais, pouco se sabe sobre a extensão desses ganhos em relação aos atributos físicos do solo, comparativamente a ambientes agrícolas. Alguns estudos apontam pouca melhoria em relação à qualidade do solo com a implantação de monocultivo de eucalipto em áreas abandonadas ou utilizadas para cultivo agrícola (Cunha Neto et al., 2018; Rocha et al., 2016; Suzuki et al., 2014), no entanto, outros indicam que a perda da qualidade física é maior quando as áreas naturais são convertidas em pastagens e cultivo convencional (Gomes; Marciano; Faustino, 2018; Silva et al., 2017). Contudo, a maior parte dos estudos são desenvolvidos para o domínio do Cerrado. Estudos para o bioma da Mata Atlântica ainda são escassos na literatura. Nesse sentido, o presente estudo buscou avaliar as alterações ocorridas nos atributos físico-hídricos em um solo sob eucalipto, comparando-o com o uso anterior de pastagem, no domínio da Mata Atlântica.

METODOLOGIA

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em parcelas ocupadas por eucalipto e pastagem, localizadas no distrito de Rive, município de Alegre, Espírito Santo, Brasil (Figura 1). O clima local é do tipo Aw, tropical de inverno seco e verão chuvoso, segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). Os ensaios foram realizados entre os meses de maio e julho de 2023. Nesse período foi registrada 69,2 mm de pluviosidade e temperatura média de 20,3°C, na estação automática A617 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), situada a aproximadamente 4 km das parcelas experimentais.

Figura 1 - Município de Alegre (ES): Localização das parcelas de eucalipto e pastagem, e seus respectivos pontos de amostragem, 2024

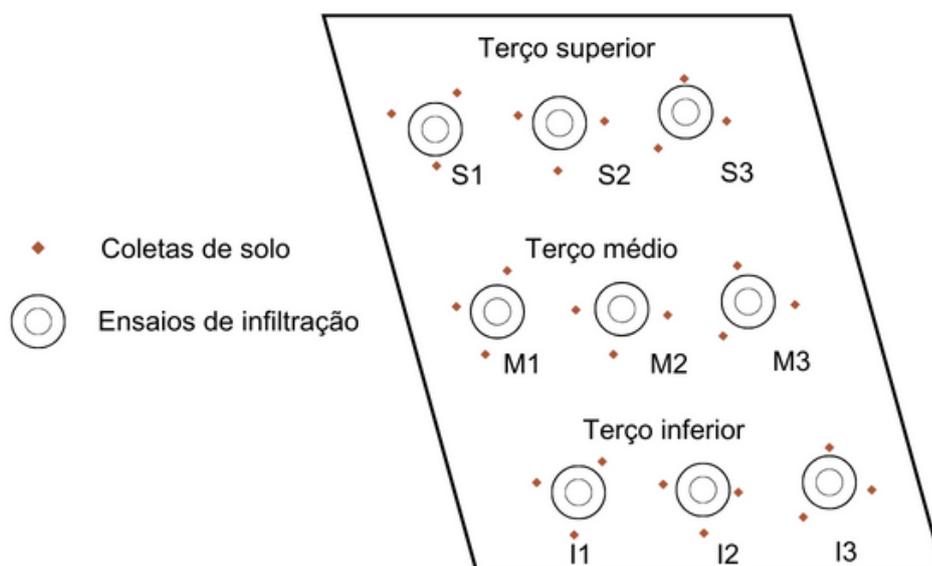


Fonte: os autores, 2024.

A área de estudo é composta por duas parcelas de aproximadamente 0,50 ha cada, uma ocupada por plantio do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* e a outra com pastagem extensiva utilizada para criação de gado leiteiro. As áreas são adjacentes, possuindo relevo ondulado, com declividade aproximada de 12%. O solo das parcelas é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, de textura média (Fonseca et al., 2020). Ambas as parcelas possuem longo histórico de uso para pastagem extensiva de gado. O atual cultivo de eucalipto foi estabelecido em março de 2018. Entre 2011 e 2018 a área era ocupada por pastagem manejada em rotação de piquetes, com prática de irrigação e adubação. A parcela correspondente à pastagem extensiva foi conduzida sem realização de nenhum tipo de manejo em relação à correção de acidez, adubação ou irrigação. Esta situação é correspondente à situação da parcela de eucalipto antes de 2011, sendo, portanto, considerada como o uso anterior do solo em relação à parcela de eucalipto.

As coletas e ensaios de infiltração foram realizadas nos terços inferior, médio e superior das parcelas, que possuem diferença de aproximada de cinco metros de elevação entre os terços (Figura 2).

Figura 2 - Município de Alegre (ES): Esquema de coletas de solo e ensaios de infiltração de água no solo, 2024.



Fonte: os autores, 2024.

A caracterização química das áreas de estudo foi realizada por meio da coleta de solo em três pontos próximos a cada ensaio de infiltração, nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, e posterior análise química, de acordo com o manual de análises de solo da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias - Embrapa (Teixeira et al., 2017).

Ensaio de infiltração

Os ensaios de infiltração foram realizados em nove pontos para cada uso, distantes entre si em aproximadamente 30 m. Os pontos foram escolhidos observando a ausência de formigueiros, cupinzeiros e estradas ou outras condições que influenciariam os resultados. Para a realização dos ensaios de infiltração foi utilizado o método do infiltrômetro de anéis, descrito em (Brandão et al., 2006), sendo determinada a taxa de infiltração estável (Tie).

Caracterização física do solo

Com intuito de caracterizar o solo, foram abertas pequenas trincheiras em três pontos próximos a cada local de ensaio de infiltração, para a coleta de amostras indeformadas e deformadas do solo nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm. As amostras indeformadas foram retiradas utilizando anéis volumétricos de aço inox com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura.

A partir das amostras deformadas foram realizadas as seguintes análises: granulometria, de acordo com metodologia de Teixeira et al. (2017) e carbono orgânico total (COT) de acordo com metodologia de Yeomans e Bremner (1988) adaptada por Mendonça e Matos (2005), sendo adotada uma concentração de 0,2 M de sulfato de amônio ferroso [$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$] e 0,50 g de amostra de solo. As amostras indeformadas foram utilizadas para a determinação de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e densidade do solo (Ds).

Para a determinação da granulometria, foi realizada a dispersão química/mecânica das amostras com uma solução de hidróxido de sódio 1 mol .L⁻¹, por meio do agitador do tipo Wagner a 50 rpm por 16 h, seguida pela separação das frações areia, por peneiramento e das frações silte e argila por sedimentação e determinação por meio do método da pipeta. A densidade do solo foi obtida pela relação entre a massa do solo seco mantido em estufa a 105 °C por 24 horas e o volume do anel

volumétrico. A porosidade total foi obtida pela mensuração da massa de água necessária para saturar a amostra de solo em anel volumétrico e a massa do solo seco em estufa. Considera-se que a densidade da água seja igual a 1000 kg m^{-3} , portanto a diferença obtida entre as massas de água é igual ao seu volume. A microporosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão, com uso de amostras indeformadas saturadas e de volume conhecido. Foi aplicada a tensão de 0,60 m (tensão de 6 kPa) de coluna de água e após o equilíbrio as amostras foram pesadas. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e microporosidade (Teixeira et al., 2017). A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada a partir de ensaios realizados com penetrômetro de impacto modelo Stolf, em três pontos próximos aos locais dos ensaios de infiltração, considerando a umidade atual do solo no momento dos ensaios (Stolf, 1991).

Análise estatística dos atributos físicos do solo

Os dados de D_s , P_t , M_a , M_i e T_{ie} obtidos de ambas as áreas foram padronizados e utilizados para a construção de dendrogramas de dissimilaridade a partir da distância euclidiana. Realizou-se Análise de Componentes Principais (PCA) a partir desses mesmos dados, com o objetivo de identificar as variáveis que mais influenciam a área como um todo. Foi estabelecida a correlação de Pearson entre essas variáveis físicas do solo de cada área. Essas análises foram realizadas em caráter exploratório dos dados.

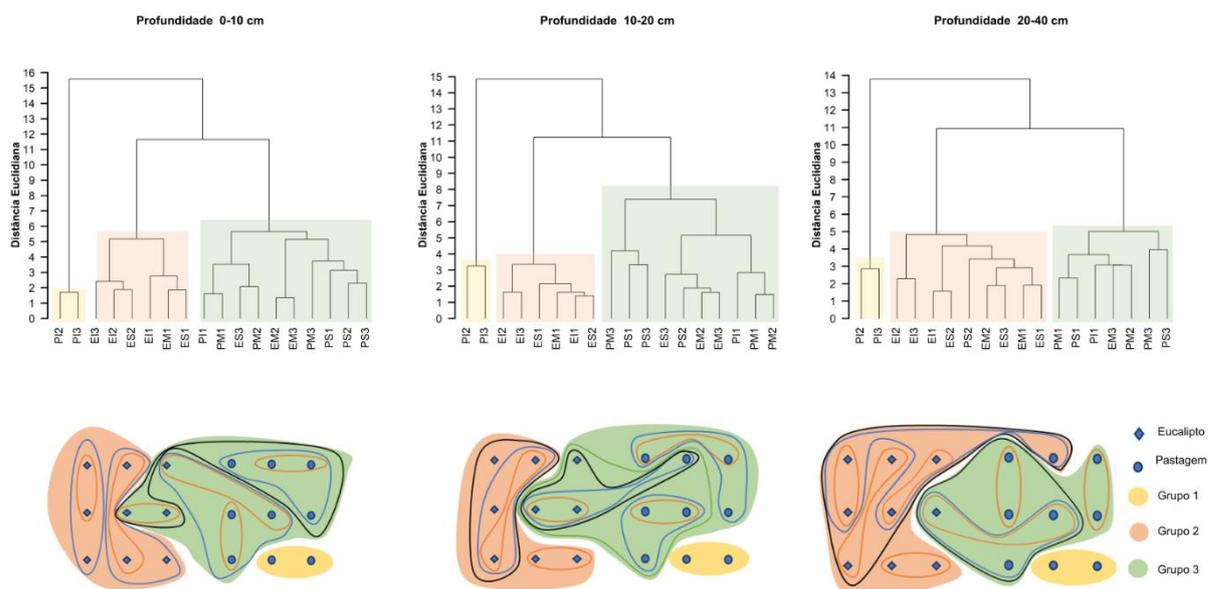
A normalidade dos dados foi avaliada a partir do teste de Shapiro-Wilk. Para avaliar se houve diferença entre as duas áreas, foi realizado o teste F da ANOVA a 5% de significância. As profundidades de amostragem (0-10, 10-20 e 20-40 cm) foram consideradas fatores independentes na análise estatística, de forma que as comparações foram realizadas dentro de cada profundidade, para cada variável analisada. Todas as análises foram realizadas com o uso do *software* RStudio, versão 4.3.2 (R Core Team, 2023).

RESULTADOS

Caracterização geral da área

Pode-se observar, na Figura 3, a partir da distância euclidiana, a formação de três grupos principais diferentes entre si, cujas médias dos atributos físicos são apresentadas na Tabela 1. Os pontos 2 e 3 do terço inferior da pastagem (PI2 e PI3) se mantêm os mais discrepantes em todas as profundidades, formando o grupo 1, onde foram obtidos valores muito baixos de T_{ie} (média de 12 mm h^{-1}), o menor valor de COT (média de $14,83 \text{ g kg}^{-1}$) e a maior microporosidade (média de $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), e sua textura é argilosa.

Figura 3 - Município de Alegre (ES): Dendrogramas de dissimilaridade entre as unidades amostrais nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, pelo método da distância euclidiana, utilizando dados dos atributos físicos do solo, em área de pastagem e eucalipto, 2024



As siglas indicam a posição do ponto de coleta na parcela, sendo respectivamente a indicação da área (E – Eucalipto, P – Pastagem), a posição na encosta (I – terço inferior, M – terço médio, S – terço superior) e numeração dos pontos (1, 2 ou 3), conforme a Figura 2.

Fonte: os autores, 2024.

Tabela 1 - Município de Alegre (ES): Médias dos atributos do solo dos grupos formados a partir do dendrograma de dissimilaridade, 2024

Profundidade (cm)	RP(MPa)	Umidade	Ds (kg dm ⁻³)	Pt (m ³ m ⁻³)	Mi (m ³ m ⁻³)	Ma (m ³ m ⁻³)	Argila (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Areia grossa (g kg ⁻¹)	Areia fina (g kg ⁻¹)	Tie (mm h ⁻¹)	COT (g kg ⁻¹)
Grupo 1												
0-10	10,23	11,08	1,55	0,47	0,39	0,09	382,47	155,35	280,24	181,93	12,0	12,92
10-20	10,57	13,74	1,49	0,49	0,38	0,11	394,94	179,14	260,74	165,17	12,0	17,83
20-40	10,12	16,63	1,56	0,47	0,37	0,09	462,61	138,12	238,89	160,38	12,0	13,74
Média	10,31	13,82	1,53	0,48	0,38	0,10	413,34	157,54	259,96	169,16	12,0	14,83
Grupo 2												
0-10	9,03	17,77	1,66	0,40	0,28	0,13	256,66	60,62	572,81	109,92	55,4	19,32
10-20	6,90	15,86	1,52	0,43	0,24	0,19	257,50	59,42	570,69	112,39	55,4	20,80
20-40	10,66	13,85	1,53	0,43	0,24	0,19	301,43	59,61	498,14	140,83	58,5	19,61
Média	9,04	15,63	1,56	0,42	0,25	0,17	274,82	59,85	542,31	123,02	56,6	19,88
Grupo 3												
0-10	12,00	9,80	1,53	0,44	0,29	0,15	301,05	54,33	483,61	161,01	107,3	14,99
10-20	13,24	12,11	1,55	0,45	0,28	0,17	342,30	49,40	446,92	161,39	107,3	17,26
20-40	14,47	14,09	1,52	0,45	0,29	0,16	381,01	51,04	423,76	144,19	117,2	20,05
Média	13,15	11,85	1,54	0,45	0,29	0,16	338,63	51,63	453,41	156,34	110,1	17,25

RP – Resistência à penetração Ds – Densidade do solo; Pt – porosidade total; Mi – Microporosidade; Ma – macroporosidade; Tie – Taxa de infiltração estável; COT – carbono orgânico total.

Fonte: os autores, 2024.

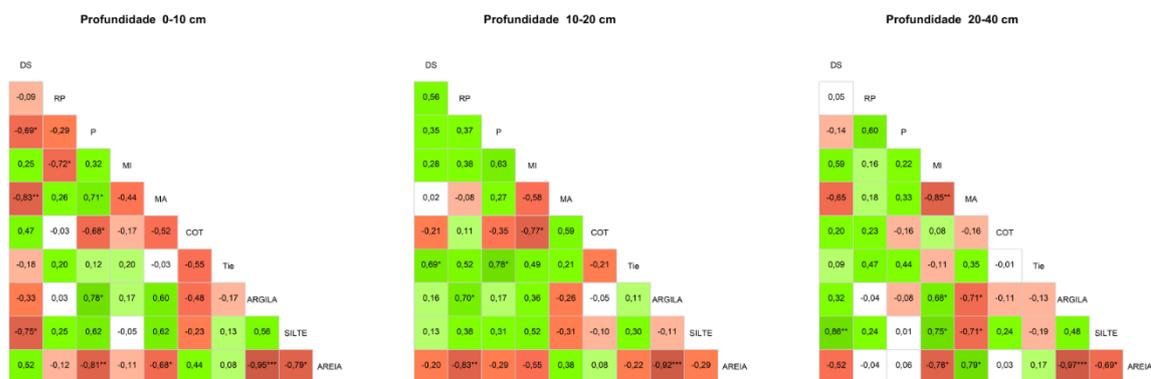
O grupo 1, apesar de ter valores de densidade bem próximos dos demais pontos da pastagem, possui menor macroporosidade e COT, quando comparados com os grupos 2 e 3.

O grupo 2 é formado principalmente pelos pontos mais à esquerda do plantio de eucalipto, com alguma variação em decorrência da profundidade. Esse grupo é caracterizado por apresentar menor microporosidade ($0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), maior densidade, principalmente na camada superficial do solo ($1,66 \text{ kg dm}^{-3}$), e valores mais baixos de Tie em relação ao grupo 3 (média de $56,64 \text{ mm h}^{-1}$), com sua textura média.

Os pontos dos terços médio e superior da pastagem, juntamente com alguns pontos do terço médio e superior do eucalipto formam o grupo 3. Este possui os maiores valores de Tie (média de $110,14 \text{ mm h}^{-1}$), sua densidade é bem similar nas três camadas, com média de ($1,54 \text{ kg dm}^{-3}$) e textura média.

As correlações de Pearson para eucalipto e pastagem são apresentadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Na área de eucalipto, a Tie não se correlacionou de forma significativa com nenhuma das demais variáveis na camada superficial. A porosidade total, na camada de 0-10 cm, nessa área, está mais correlacionada positivamente com a macroporosidade e com o teor de argila presente no solo e se correlaciona de forma inversa com a densidade e com a areia. A Tie se correlacionou de forma significativa e positiva com a macroporosidade e de forma significativa negativa com a microporosidade na camada de 0-10 cm, na área de pastagem. A porosidade total está mais correlacionada com a microporosidade, e esta, por sua vez, está correlacionada à textura do solo e de forma inversa com a Tie, na profundidade de 0-10 cm.

Figura 4 - Município de Alegre (ES): Correlação de Pearson para os atributos do solo nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm do solo sob cultivo de eucalipto, 2024



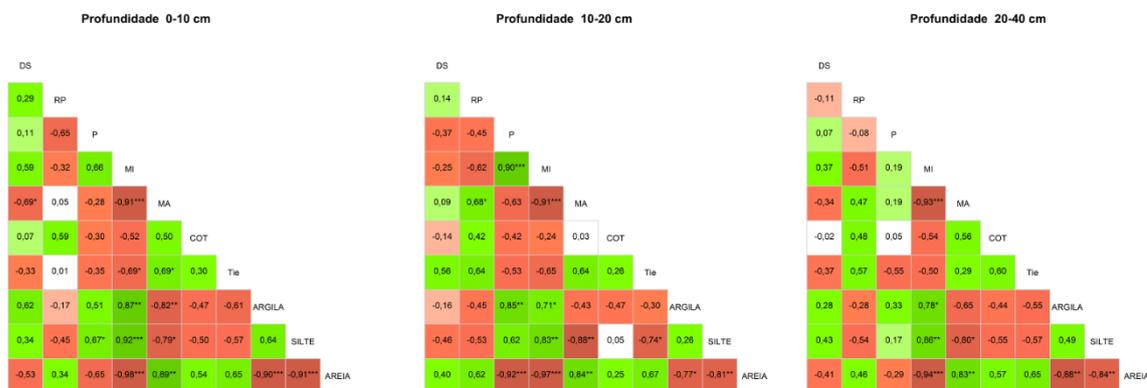
Ds – Densidade do solo (kg dm^{-3}); RP – Resistência à penetração (MPa); P – porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); MI – Microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); MA – macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); COT – carbono orgânico total (g kg^{-1}); Tie – Taxa de infiltração estável (mm h^{-1}).

Cores verdes indicam correlação positiva e cores avermelhadas indicam correlação negativa. Quanto mais forte a tonalidade, maior a correlação, ausência de cor indica ausência de correlação.

Fonte: os autores, 2024.

A análise de componentes principais (Figura 6) mostra que aproximadamente 47% das variações encontradas na área é explicada pela componente principal um (CP1) e cerca de 24% pode ser explicada pela componente principal dois (CP2). Na camada de 0-10 cm, pode-se observar que a CP1 está mais associada com a microporosidade e com os teores de argila e areia, e em menor proporção ao COT. Já a densidade do solo, a macroporosidade e a Tie na camada superficial, e essas juntamente com a resistência à penetração nas demais profundidades, estão mais associadas à CP2. Pode-se perceber maior homogeneidade dos pontos do eucalipto e maior dispersão dos pontos da pastagem, sendo que o agrupamento dos pontos da pastagem está, em parte, relacionado com a microporosidade, o teor de argila, com a Tie e com a RP, enquanto no eucalipto está mais relacionado ao teor de areia e macroporosidade.

Figura 5 - Município de Alegre (ES): Correlação de Pearson para os atributos do solo nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm do solo sob cultivo de pastagem, 2024

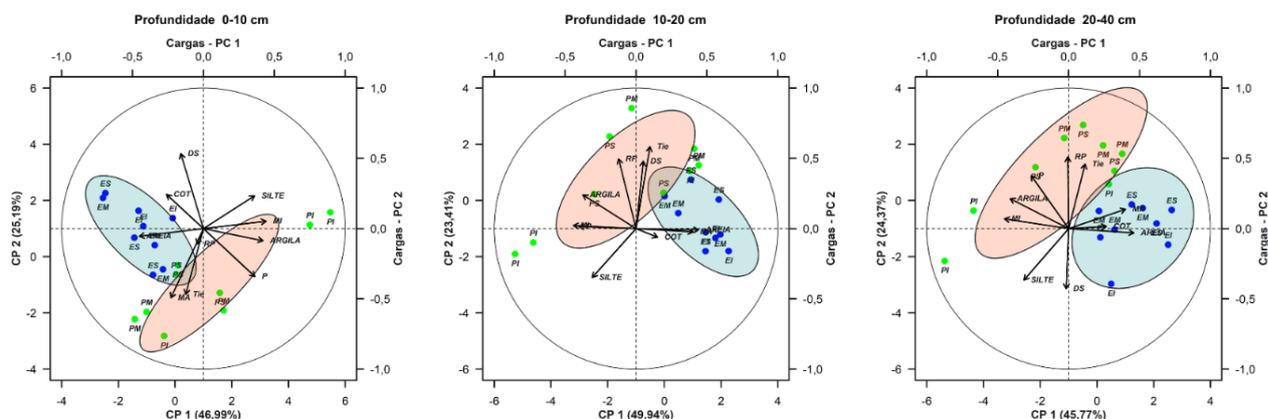


Ds – Densidade do solo (kg dm⁻³); RP – Resistência à penetração (MPa); Pt – porosidade total (m³ m⁻³); Mi – Microporosidade (m³ m⁻³); Ma – macroporosidade (m³ m⁻³); COT – carbono orgânico total (g kg⁻¹); Tie – Taxa de infiltração estável (mm h⁻¹).

Cores verdes indicam correlação positiva e cores avermelhadas indicam correlação negativa. Quanto mais forte a tonalidade, maior a correlação, ausência de cor indica ausência de correlação.

Fonte: os autores, 2024.

Figura 6 - Município de Alegre (ES): Biplots da análise de componentes principais representando a relação entre os atributos avaliados e os usos de eucalipto e pastagem, para as camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, 2024



As cores são meramente ilustrativas, com intuito de destacar o agrupamento dos pontos de coleta do eucalipto (pontos em azul escuro) e da pastagem (pontos em verde claro).

Fonte: os autores, 2024.

Atributos químicos do solo sob eucalipto e pastagem

A Tabela 2 traz os resultados dos atributos químicos analisados nas áreas de eucalipto e pastagem. Ambas as áreas têm acidez média, valores muito baixos de alumínio no solo. De modo geral, os valores dos nutrientes variam de baixo a médio. Os valores de fósforo estão baixos, exceto na profundidade de 0-10 cm do eucalipto, os valores de potássio são médios nas primeiras camadas para ambas as culturas, já o cálcio está baixo na profundidade de 0-10cm do eucalipto e médio para as demais e o magnésio tem valores médios, exceto na profundidade de 10-20 cm da pastagem.

Tabela 2 - Município de Alegre (ES): Valores médios dos atributos químicos do solo sob cultivo de eucalipto e pastagem, nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, 2023

Cultura	Profundidade cm		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	t	T	S.B.	V	m	ISNa
			H ₂ O	_____	mg dm ⁻³	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
Eucalipto	0-10	Md	5,67	12,94	73,27	1,56	1,35	0,55	0,02	2,57	2,11	4,66	2,09	44,42	1,36	0,13
		SD	0,16	8,53	21,36	1,88	0,32	0,14	0,03	0,38	0,48	0,82	0,51	4,59	1,61	0,16
	10-20	Md	5,41	8,43	63,56	0,33	1,64	0,75	0,01	1,74	2,56	4,29	2,55	60,84	0,29	0,03
		SD	0,16	5,83	13,33	1,00	0,25	0,19	0,02	0,71	0,43	0,86	0,44	12,38	0,86	0,08
	20-40	Md	5,47	1,30	34,33	2,11	1,84	0,86	0,00	1,85	2,80	4,65	2,80	60,71	0,00	0,20
		SD	0,21	0,81	12,33	1,62	0,23	0,24	0,00	0,56	0,45	0,88	0,45	6,21	0,00	0,16
Pastagem	0-10	Md	5,86	9,76	62,44	1,67	1,58	0,59	0,03	1,93	2,36	4,26	2,34	53,73	1,55	0,16
		SD	0,34	11,56	21,95	1,58	0,53	0,23	0,03	0,21	0,72	0,76	0,74	8,80	1,53	0,15
	10-20	Md	5,80	1,19	68,33	7,11	2,89	1,31	0,00	1,80	4,41	6,21	4,41	70,08	0,00	0,51
		SD	0,24	1,58	60,10	1,83	0,92	0,42	0,00	0,50	1,26	1,45	1,26	8,81	0,00	0,10
	20-40	Md	5,80	1,16	15,67	2,89	1,67	0,69	0,00	1,75	2,42	4,17	2,42	58,33	0,00	0,31
		SD	0,30	0,95	10,81	1,17	0,34	0,34	0,00	0,48	0,61	0,88	0,61	8,69	0,00	0,14

pH – potencial hidrogeniônico em água; P – fósforo (extrator Mehlich¹); K – potássio (extrator Mehlich¹); Na – sódio; Ca – cálcio (extrator KCl); Mg – magnésio (extrator KCl); Al – alumínio (extrator KCl); H+Al – acidez potencial; t – capacidade de troca catiônica efetiva; T – capacidade de troca catiônica a pH 7; SB – soma de bases trocáveis; V – índice de saturação em bases; m – índice de saturação em alumínio, ISNa - índice de saturação em sódio; Md – média; SD – desvio padrão.

Fonte: os autores, 2024.

Atributos físicos do solo sob eucalipto e pastagem

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos atributos físicos do solo nas áreas de eucalipto e da pastagem, submetidos ao teste F, com significância de 0,05. Os valores médios da taxa de infiltração estável encontradas para o eucalipto e pastagem estão apresentados na Tabela 4. Ambas as áreas apresentam solos com condições físicas menos favoráveis à permeabilidade, como alta densidade, baixo teor de matéria orgânica e elevada resistência à penetração. As *Tie*'s encontradas nessas áreas são consideradas como representativas de moderada permeabilidade (entre 40 e 190 mm h⁻¹), de acordo com os critérios propostos por Pruski et al. (1997). Houve grande variação no comportamento da infiltração dentro das duas áreas estudadas, com um desvio padrão de 29,2 mm h⁻¹ para o eucalipto e 65,1 mm h⁻¹ para a pastagem, sendo que a pastagem apresentou, em média, uma *Tie* 66% maior que a área sob cultivo de eucalipto, contudo não se diferiram estatisticamente. Na camada superficial, o solo sob cultivo de eucalipto apresenta-se mais compactado e com menor porosidade total que a pastagem, o que pode contribuir para o valor mais baixo de infiltração observado, embora a diferença não seja significativa.

Tabela 3 - Município de Alegre (ES): Médias dos atributos do solo para as áreas de eucalipto e pastagem, 2024

Área	RP (MPa)	Umidade	Ds (kg dm ⁻³)	Pt (m ³ m ⁻³)	Mi (m ³ m ⁻³)	Ma (m ³ m ⁻³)	Argila (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Areia grossa (g kg ⁻¹)	Areia fina (g kg ⁻¹)	COT (g kg ⁻¹)
0-10 cm											
Eucalipto	10,00 a	16,90 b	1,63 a	0,41 b	0,28 b	0,13 a	263,2 b	64,8 a	556,46 a	115,58 b	17,25 a
Pastagem	11,23 a	8,30 a	1,52 b	0,46 a	0,32 a	0,14 a	327,4 a	70,5 a	425,04 b	177,03 a	15,16 a
SD	3,212	5,354	0,078	0,030	0,037	0,025	49,847	35,697	104,243	40,02	3,487
CV%	30,62	42,498	4,95	6,93	12,37	18,66	16,88	52,77	21,24	27,36	21,52
10-20 cm											
Eucalipto	8,37 b	15,36 a	1,53 a	0,44 b	0,25 b	0,19 a	273,3 b	62,1 a	545,92 a	118,68 b	19,20 a
Pastagem	13,29 a	11,72 b	1,54 a	0,46 a	0,31 a	0,15 b	366,5 a	72,2 a	389,05 b	172,27 a	17,81 a
SD	3,790	2,768	0,051	0,022	0,044	0,024	66,262	43,595	114,636	39,214	4,989
CV%	35,00	20,445	3,32	4,92	15,77	16,77	20,71	64,92	24,52	26,96	26,96
20-40 cm											
Eucalipto	10,56 a	15,25 a	1,55 a	0,43 b	0,25 b	0,18 a	303,5 b	64,9 a	504,23 a	127,54 b	20,66 a
Pastagem	14,03 a	13,28 a	1,51 a	0,46 a	0,31 a	0,15 a	406,1 a	64,2 a	368,32 b	161,44 a	17,65 a
SD	4,058	2,827	0,052	0,022	0,045	0,036	68,143	32,730	101,53	30,908	4,554
CV%	33,01	19,812	3,40	4,97	16,07	22,22	19,21	50,72	23,27	21,39	23,77

RP – Resistência à penetração (MPa); Ds – Densidade do solo; Pt – porosidade total; Mi – Microporosidade; Ma – macroporosidade; COT – carbono orgânico total; SD – Desvio padrão; CV% - coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste F ao nível de 5% de significância.

Fonte: os autores, 2024.

Tabela 4 - Município de Alegre (ES): Médias da taxa de infiltração estável (Tie) para as áreas de eucalipto e pastagem, 2024

Área	Tie (mm h ⁻¹)
Eucalipto	63,7 a
Pastagem	95,2 a
SD	51,5
CV%	64,9

SD – Desvio padrão; CV% - coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste F ao nível de 5% de significância

Fonte: os autores, 2024.

DISCUSSÃO

Em caráter exploratório dos resultados, pode-se analisar em conjunto o agrupamento pela distância euclidiana, a correlação linear de Pearson e a PCA (Figuras 3, 4, 5 e 6 e Tabela 1), sendo possível inferir que a diferença entre as áreas agrupadas está mais relacionada às suas características texturais e à relação de macro e microporos, uma vez que a presença da vegetação não influenciou na diferença de infiltração de água no solo.

Foi observado em campo que os pontos que compõem o grupo 1 estão localizados em um local de passagem diário do gado, por isso, sofrem com pisoteio mais intenso que os demais pontos (Figura 3). Esse fato associado à menor presença de matéria orgânica pode ter causado a redução da macroporosidade, e isso, por sua vez, pode estar relacionado à menor infiltração, já que a presença de macroporos está associada ao fluxo de ar e água no solo (Pagliai; Vignozzi; Pellegrini, 2004). Rabot et al. (2018) mostram em seu estudo que o aumento da taxa de infiltração ocorre de acordo com o aumento do tamanho médio dos poros, e que solos de textura argilosa com poros maiores que 3 mm apresentam maiores taxas de infiltração por ter maior estabilidade de agregados em comparação a solos com textura arenosa. Os autores também destacam a importância da matéria orgânica para aumentar a agregação. No caso desse grupo, somente o maior teor de argila não foi suficiente para causar o aumento na infiltração, devido aos outros fatores envolvidos, como o baixo teor de matéria orgânica e a compactação pelo pisoteio.

Para o grupo 3 (Figura 3), a proporção de macroporosidade/porosidade total praticamente dobra em relação ao grupo 1 (33,66 e 18,41%, respectivamente), indicando que mesmo com a densidade semelhante e com textura média, a presença de macroporos foi o que mais influenciou na quantidade de água infiltrada. O grupo 2 apresenta elevada densidade do solo, principalmente na primeira camada, o que pode ter sido um fator que dificultou a infiltração nessa área (Figura 3). No geral, a taxa de infiltração estável é inversamente proporcional à densidade do solo (Rabot et al., 2018), isso também pode ser observado para esse estudo a partir dos dados da correlação (Figura 4) que mostram uma relação negativa, embora fraca, entre a Ds e a Tie, para a camada de 0-10 cm. Essa análise também sustenta o fato que a maior Ds impacta na menor presença de macroporos (Basset et al., 2023; Mongil-Manso; Navarro-Hevia; San Martín, 2021).

A variação da Tie dentro das áreas foi alta, consistindo em maiores valores na área de pastagem que em área de eucalipto, sendo a variabilidade espacial e temporal da infiltração bem relatada na literatura (Alves et al., 2005; Khodaverdiloo et al., 2017; Sá et al., 2023). Em áreas de pastagem, a variação espacial da infiltração pode estar relacionada ao relevo e à movimentação do gado, além de o aumento da intensidade de pastejo reduzir a infiltração, especialmente até os 10 cm de profundidade (Miguel; Vieira; Grego, 2009). Já para ambientes florestais Penna, Fernandes e Pereira (2023) indicam que a homogeneidade da condutividade hidráulica acompanha o estágio de desenvolvimento da floresta, sendo mais homogênea em ambientes mais maduros.

O teste estatístico (Tabela 4) atesta que não há influência da vegetação na Tie. O que se observa são diferenças nas características físicas do solo de um uso para o outro (Tabela 3). Apesar de ambas as áreas apresentarem textura média, o solo da pastagem tem maior teor de argila, o que pode contribuir para maior porosidade total, e melhor relação de macroporos e microporos e menor densidade, favorecendo as condições estruturais do solo. Cabe ressaltar que as variações observadas no teor de argila entre as profundidades observadas trata-se de uma característica do solo, uma vez que as

avaliações não foram realizadas nos horizontes do solo, e sim em três profundidades (0-10, 10-20 e 20-40 cm) A presença de indivíduos arbóreos, em tese, impacta positivamente na infiltração de água no solo pela presença de caminhos preferenciais das raízes (Penna; Fernandes; Pereira, 2023), e maior aporte de matéria orgânica (Mendonça et al., 2009), contudo, não é o observado nesse estudo. Isso pode estar relacionado com o curto período de implantação do eucalipto na área. De forma semelhante a deste trabalho, um estudo em Latossolos no estado do Pará, sob pastagem abandonada e eucalipto com dois anos de idade também não obtiveram diferença de Tie para as áreas, o que foi atribuído ao uso de máquinas e operações de preparo do solo para o eucalipto e pisoteio animal para a área de pastagem (Rocha et al., 2016).

A diferença do sistema radicular das árvores em relação ao das gramíneas também pode ter influenciado. O sistema radicular das gramíneas forma uma rede densa de raízes finas recobrando a camada superficial, contribuindo para a estabilidade dos agregados e aumentando a quantidade de poros, o que pode permitir com mais facilidade a entrada de água no solo (Marchini et al., 2015). Já as árvores, apesar de terem sistema radicular mais profundo e extenso, a camada superficial, principalmente as entrelinhas, não tem a presença tão abrangente das raízes.

Alguns estudos também apontam que a distância dos testes de infiltração em relação às árvores também pode impactar nos resultados de infiltração obtidos. Nesse estudo, os ensaios foram realizados a uma distância média de 1,5 m das árvores. Zadeh; Sepaskhah, (2016) realizaram ensaios de infiltração a 0,50 m das árvores e na entrelinha e constataram que para solo de textura média a infiltração foi 152% maior próxima da árvore que na entrelinha. Revell et al. (2022) encontraram infiltração média a 0,10 m das árvores 75,87% maior do que a 2,0 metros, no período de inverno em solos de textura média a argilosa.

Em síntese, mesmo a pastagem apresentando algum grau de degradação, a presença de gramíneas cobrindo grande parte do solo e as diferenças na distribuição dos poros não levaram a diferença significativa na taxa de infiltração em relação ao eucalipto. Os resultados encontrados também podem ser consequência de a área de eucalipto ainda sofrer pisoteio esporádico de animais, fato evidenciado pela presença de excrementos no local nos dias de coletas. A área de eucalipto não possui camada espessa de serrapilheira, nem sub-bosque formado, reduzindo a proteção do solo ao pisoteio do gado, o que pode ter contribuído na redução da quantidade de poros, principalmente dos macroporos, e elevação da densidade especialmente na primeira camada. Desse modo, o período curto de mudança no uso do solo associado ao manejo adotado não foi suficiente para melhorar a condição física do solo sob cultivo de eucalipto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diferenças entre as áreas após a mudança de uso estão mais relacionadas à macro e microporosidade e aos teores de argila e areia do solo. Não houve diferença de Tie entre as áreas, indicando que para as condições de manejo adotadas, o período de 5 anos após o plantio de eucalipto não foi suficiente para aumentar a capacidade de infiltração de água no solo. Desse modo, é necessário avaliar a longo prazo os efeitos da conversão de pastagens em silvicultura sobre os atributos físico-hídricos do solo.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) – Edital FAPES nº 11/2021, outorga nº 136/2022.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, Germany v. 22, p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ALVES, M. C. et al. Propriedades físicas e infiltração de água de um Latossolo Vermelho Amarelo (Oxisol) do noroeste do estado de São Paulo, Brasil, sob três condições de uso e manejo. **Cad. do**

- Lab. Xeol. Laxe, Corunha, v. 30, p. 167–180, 2005. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/61899119.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2024.
- BASSET, C. *et al.* How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. **Soil and Tillage Research**, v. 226, p. 105577, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105577>
- BENGOUGH, A. G. Water dynamics of the root zone: rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology. **Vadose Zone Journal**, v. 11, 2012. <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0111>
- BEZERRA, C. B. *et al.* Latossolo húmico sob pastagem com diferentes intensidades de usos: atributos químicos e físico-hídricos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, Recife - PE, v. 14, p. 1–9, 2019. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i1a5603>
- BOHEM, S.; SCHUMER, C. **10 conclusões do Relatório do IPCC sobre Mudanças Climáticas de 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/10-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-sobre-mudancas-climaticas-de-2023>. Acesso em: 7 mar. 2024.
- BRANDÃO, V. dos S. *et al.* **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006.
- CUNHA NETO, F. V. da *et al.* Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em além Paraíba - MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria - RS, v. 28, p. 13–24, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509831569>
- FONSECA, A. A. *et al.* Phosphorus availability and grass growth in biochar-modified acid soil: a study excluding the effects of soil pH. **Soil Use and Management**, v. 36, p. 714 -725, 2020. <https://doi.org/10.1111/sum.12609>
- GOMES, D. S.; MARCIANO, C. R.; FAUSTINO, L. L. Physical quality of a typic hapludult soil under forest leguminous trees and pasture. **Floresta e Ambiente**, Seropédica - RJ, v. 25, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.040017>
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes>. Acesso em: 15 maio 2024.
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes>. Acesso em: 16 maio 2024.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. **Estação Alegre A617**. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 13 dez. 2023.
- KHODAVERDILOO, H. *et al.* Ring diameter effects on determination of field-saturated hydraulic conductivity of different loam soils. **Geoderma**, v. 303, p. 60–69, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.031>
- LAPIG/UFMG - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás. **Atlas das pastagens**. 2021. Disponível em: <https://atlasdaspastagens.ufg.br/>. Acesso em: 1 mar. 2024.
- MARCHINI, D. C. *et al.* Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 19, p. 574–580, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p574-580>
- MENDONÇA, L. A. R. *et al.* Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, p. 89–98, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000100010>
- MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. **Matéria orgânica do solo**. Viçosa: 2005.
- MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília – DF, v. 44, p. 1513–1519, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001100020>
- MONGIL-MANSO, J.; NAVARRO-HEVIA, J.; SAN MARTÍN, R. Does forest restoration influence soil infiltrability? A case study in the restored woodland of Sierra de Ávila (Central Spain). **Journal of Mountain Science**, v. 18, p. 1778–1793, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6636-8>
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 131–143, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>

- PENNA, M. F. A.; FERNANDES, N. F.; PEREIRA, N. R. Mudanças nas propriedades químicas e de condutividade hidráulica do solo associadas a diferentes estágios de sucessão ecológica. *In: Biodiversidade e saúde na Estação Biológica Fiocruz Mata Atlântica: pesquisa, conservação e educação*. Ponta Grossa, PR: Atena, 2023. p. 318–337. <https://doi.org/10.22533/at.ed.21623050614>
- PRUSKI, F. F. *et al.* Model to Design Level Terraces. *J. Irrig. Drain. Eng.*, v. 123, p. 8–12, 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:1\(8\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:1(8))
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 12 mar. 2023.
- RABOT, E. *et al.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, v. 314, p. 122–137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria - RS, v. 27, p. 29–48, 2003. Disponível em: <https://cienciaambiente.com.br/27-2/>. Acesso em: 16 maio 2024.
- REVELL, N. *et al.* The impact of tree planting on infiltration dependent on tree proximity and maturity at a clay site in Warwickshire, England. *Water*, v. 14, p. 892, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14060892>
- ROCHA, J. E. C. da *et al.* Organic matter and physical-hydric quality of an oxisol under eucalypt planting and abandoned pasture. *CERNE*, Lavras - MG, v. 22, p. 381–388, 2016. <https://doi.org/10.1590/01047760201622042224>
- SÁ, L. M. da S. *et al.* Infiltração de água no solo sob diferentes condições de uso: sistema agroflorestal, pastagem e floresta. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 21, p. 12379–12379, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-100>
- SANTANA, M. L. T. *et al.* Impacts of land use changes on soil functions and water security: insights from a three-year-long study in the Cantareira System, Southeast of Brazil. *Sustainability*, Basel - Switzerland v. 15, p. 13395, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151813395>
- SILVA, R. F. da *et al.* Impacts of land-use and management systems on organic carbon and water-physical properties of a Latossolo Amarelo (Oxisol). *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina – PR, v. 38, p. 109–124, 2017. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n1p109>
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p. 229–235, 1991.
- SUN, D. *et al.* The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, v. 626, p. 1394–1401, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.104>
- SUZUKI, L. E. A. S. *et al.* Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, v. 38, p. 94–106, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100009>
- TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras - MG, v. 35, p. 437–445, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000300001>
- TSAI, D. *et al.* **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2022**. SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, 2023. Disponível em: <https://seeg.obass.info/wp-content/uploads/2024/02/SEEG11-RELATORIO-ANALITICO.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2024.
- ZADEH, M. K.; SEPASKHAH, A. R. Effect of tree roots on water infiltration rate into the soil. *Iran Agricultural Research*, v. 35, p. 13–20, 2016.

Recebido em: 23/05/2024

Aceito para publicação em: 19/09/2024