

Propriedades físicas de um Argissolo após 17 anos de florestamento com *Eucalyptus* spp.

Physical properties of an Ultisol after 17 years of forestation with *Eucalyptus* spp.

Propiedades físicas de un Argissolo después de 17 años de forestación con *Eucalyptus* spp.

Recebido: 29/03/2021 | Revisado: 09/04/2021 | Aceito: 04/05/2021 | Publicado: 17/05/2021

Estéfane Chaves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9102-1429>
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: ecagronomia@gmail.com

Caroline Valverde dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9432-4804>
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Brasil
E-mail: caroline.valverde@uesb.edu.br

Priscila Vogelei Ramos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6232-3441>
Universidad de Burgos, Espanha
E-mail: priscilav.ramos@yahoo.com.br

Alberto Vasconcellos Inda Junior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5252-0313>
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
E-mail: alberto.inda@ufrgs.br

Laurent Caner

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5618-744X>
Université de Poitiers, França
E-mail: laurent.caner@univ-poitiers.fr

Resumo

A expressiva expansão do setor florestal no Brasil tem dado evidência a estudos que direcionam suas ações de investigação para a preservação e utilização racional dos recursos naturais. A pesquisa tem demonstrado que mudanças no uso do solo, alteram as suas condições pedoambientais. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo principal investigar ações antrópicas de longa duração sobre área do bioma Pampa no Rio Grande do Sul: Efeito nos atributos físicos de solo com substituição do uso sob campo para o uso do solo com florestamento comercial de *Eucalyptus* spp. Amostras de um Argissolo Vermelho Distrófico foram coletadas em horto florestal, em triplicata e em cinco profundidades e também foi coletado um solo de controle, vegetado com campo natural. Não houve alteração na distribuição granulométrica do solo. Após 17 anos de florestamento foi observado um incremento no teor de hematita nos solos da floresta e rizosfera da floresta, aumento nos valores da suscetibilidade magnética e diminuição da área superficial específica das partículas em profundidade.

Palavras-chave: Hematita; Suscetibilidade magnética; Área superficial específica.

Abstract

The significant expansion of the forestry sector in Brazil has given evidence to studies that direct its research actions towards the preservation and rational use of natural resources. Research has shown that changes in land use alter its pedoenvironmental conditions. Therefore, the present study aimed to investigate long-term anthropic actions on the Pampa biome area in Rio Grande do Sul: Effect on physical properties of soil with substitution of use under natural pasture for use of commercial forestation of *Eucalyptus* spp. Samples of an Ultisol (Argissolo Vermelho Distrófico, SiBCS) were collected in a planted forest, in triplicate and at five depths, and a control soil, vegetated with a natural pasture, was also collected. There was no change in the particle size distribution of the soil. After 17 years of forestation, an increase in the hematite content was observed in the forest bulk soil and the rhizospheric soil, an increase in the values of magnetic susceptibility and a decrease in the specific surface area of the particles in depth.

Keywords: Hematite; Magnetic susceptibility; Specific surface area.

Resumen

La importante expansión del sector forestal en Brasil ha evidenciado estudios que orientan sus acciones de investigación hacia la preservación y uso racional de los recursos naturales. La investigación ha demostrado que los cambios en el uso de la tierra alteran sus condiciones pedológicas. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo investigar las acciones antrópicas a largo plazo en el área del bioma Pampa en Rio Grande do Sul: Efecto sobre los atributos físicos del suelo con sustitución de uso bajo campo por uso de tierra con forestación comercial de *Eucalyptus*

spp. Se recolectaron muestras de un Argissolo Vermelho Distrófico (SiBCS) en un huerto forestal, por triplicado para cinco profundidades, y también se recogió un suelo control, vegetado con un campo natural. No hubo cambios en la distribución granulométrica del suelo. Después de 17 años de forestación, se observó un aumento en el contenido de hematitas en los suelos forestales y la rizosfera del bosque, un aumento en los valores de susceptibilidad magnética y una disminución en la ASE de las partículas en profundidad.

Palabras clave: Hematitas; Susceptibilidad magnética; Área superficial específica.

1. Introdução

A Ciência do Solo tem investigado os impactos da atividade antrópica sobre a dinâmica biológica, química, física e mineralógica do sistema solo (Silva et al., 2014; Amaral et al., 2015; Korchagin et al., 2019; Wang et al., 2021). Essa linha de pesquisa pressupõe que o solo na sua condição natural se encontra em equilíbrio dinâmico, estabelecendo trocas de energia e matéria com os sistemas vizinhos. Quando o sistema solo é afetado por ações externas e não consegue amortizá-las, um novo estado de equilíbrio se estabelece, onde alterações podem ocorrer (Azevedo, 1996; Vezzani, 2011). Uma série de práticas agrícolas determinam mudanças pedoambientais e, conseqüentemente, em alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica, na composição química da solução e do complexo sortivo do solo, bem como na mineralogia dos mesmos.

A adoção do sistema de plantio direto em substituição ao sistema convencional de preparo do solo aumenta os teores de matéria orgânica, altera a dinâmica dos óxidos de ferro pedogênicos e a área superficial específica na camada superficial de solos tropicais e subtropicais (Silva Neto et al., 2008; Inda et al., 2010; Inda et al., 2013). Em solos altamente intemperizados, os óxidos e a matéria orgânica do solo têm papel fundamental no comportamento químico e físico dos mesmos (Almeida et al., 2003; Mazurana et al., 2017). Em solo subtropical de altitude, a queima do campo para renovação da pastagem e o florestamento com *Pinus* também contribuem para a diminuição dos teores de matéria orgânica, reduzindo ainda a área superficial específica do solo (Tomasi et al., 2012a, 2012b). Investigando também a adição de dejetos animais ao solo, Fink et al. (2014) observaram que a deposição de urina de gado e de dejetos de aves ao solo, reduziu os teores de Fe relativos aos óxidos de ferro pedogênicos, sugerindo a dissolução desses minerais na camada superficial do solo.

A evolução do plantio de eucalipto no Rio Grande do Sul (RS) tem sido expressiva, tendo abrangido uma área de 668,3 mil ha em 2019 (Ageflor, 2020). Após a conclusão da duplicação da empresa CMPC – Celulose Riograndense, a produção de celulose passou de 450 mil toneladas por ano em 2014 para 1,8 milhões de toneladas por ano atualmente, quase quadruplicando a capacidade de produção. As áreas plantadas com Eucalipto seguem em crescente expansão para atender as demandas de celulose, principalmente na metade sul do RS.

Considerando a contínua expansão do setor florestal no RS, alguns estudos têm direcionado suas ações no sentido de preservação e utilização racional dos recursos, como o solo e a água. Segundo Gmach et al. (2020) a qualidade e quantidade de material orgânico irão influenciar diretamente na disponibilidade de C. Em um Neossolo originalmente cultivado com pastagem natural observou-se que após 21 anos de cultivo com *Eucalyptus* spp. houve alteração na qualidade da matéria orgânica até 0,90 m de profundidade, foi observado que mais de 90% do C presente na matéria orgânica do solo é proveniente da floresta (Severo, 2017). O cultivo de *Eucalyptus* spp. promoveu também alterações nas características químicas do solo, aumentando a acidez potencial e reduzindo os teores de matéria orgânica e a concentração de nutrientes (K, Ca e Mg) quando comparados ao mesmo solo com pastagem e floresta nativas (Leite, 2002). Também após 10 anos de cultivo com *Eucalyptus* spp. foi observada uma diminuição nos índices microbiológicos em relação à floresta nativa no mesmo solo, além de apresentar uma menor relação C/N quando em comparação com a vegetação natural (Gama-Rodrigues et al., 2008). A conversão do tipo de cobertura resulta em um efeito direto na qualidade físico-hídrica do solo, devido redução da diversidade do material orgânico aportado no solo.

De acordo com Vezani e Mielniczuk (2009), a influência da cobertura vegetal ocorre por meio das raízes e da serapilheira, a qual fornece nutrientes para a biota do solo. A interação das plantas e da biota resulta na construção da estrutura

física do solo, cuja complexidade é maior quanto maior a quantidade, qualidade, diversidade e frequência do aporte da serapilheira. Após 10 anos de área de cerrado florestada com *Eucalyptus* spp. foi verificado um aumento na densidade do solo, o que diminuiu a dinâmica hídrica e atmosférica do solo em relação à mata nativa (Cavenage et al., 1999). Isso também pode ser atribuído ao intenso tráfego de maquinários em áreas reflorestadas, para o corte e transporte da madeira, que resultará no aumento da densidade e redução da porosidade do solo devido à compactação provocada pelo rodados do trator, influenciando de forma negativa na dinâmica da água e circulação de ar no perfil do solo (Silva et al., 2007, Reichert et al., 2007).

Como descrito anteriormente, ações antrópicas recentes sobre o sistema solo alteram as condições pedoambientais, principalmente na camada superficial dos solos (Schwertmann, 1991). Essas ações podem influenciar alterações (transformações ou dissoluções/neofomações) de minerais pedogênicos (Kämpf & Curi, 2000; Kämpf & Curi, 2003), dos teores de C e ASE do solo (Tomasi et al., 2012a, 2012b; Severo, 2017) e nas propriedades físico-hídricas do solo ((Lopes et al., 2006; Sampietro et al., 2015). Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da substituição de áreas de campo nativo por florestamentos de *Eucalyptus* spp. sobre as propriedades físicas de um Argissolo Vermelho no sul do Brasil.

2. Metodologia

2.1 Localização, coleta e preparo das amostras

A área selecionada para a realização do estudo está localizada no município de Arroio dos Ratos no estado do Rio Grande do Sul (RS) ($30^{\circ}11'20.71''S$ e $51^{\circ}35'54.40''O$). As descrições e coletas foram realizadas em duas propriedades rurais. Em uma das propriedades o solo estava sob uso de campo e na outra sob Florestamento de Eucalipto há 17 anos, em local denominado Horto Florestal Terra Dura (Figura 1), pertencente à empresa CMPC – Celulose Rio-grandense.

Figura 1. Localização do Horto florestal Terra Dura, no município de Arroio dos ratos, Rio Grande do Sul, Brasil.



Fonte: Autores.

O clima na região é classificado como subtropical úmido com períodos de seca no verão (ST UM v), com média de temperatura anual de $19,5^{\circ}C$ e pluviosidade média de 1300 mm por ano (Maluf, 2000). O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Santos et al., 2018), formado a partir de Sienogranito da Suíte Intrusiva Dom Feliciano (CPRM, 2006). O relevo é formado por coxilhas com feições de anfiteatros em altitudes médias de 150 m.

Para limitar a acidificação e manter a produção, a floresta de Eucalipto recebeu dois ciclos de adubação e calagem com aplicação de calcário dolomítico, fosfato natural, superfosfato e NPK.

Em cada área, campo e floresta, foram abertas três trincheiras com um metro de profundidade e expostos os perfis de solos. Na área de solo sob uso floresta de eucalipto, foram expostas as raízes de três árvores (uma em cada trincheira). Nas trincheiras foram coletadas amostras de solo deformadas nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m de profundidade, em triplicata. Nas trincheiras foram coletadas ainda amostras do solo aderido às raízes do eucalipto e do campo nativo na camada de 0,00-0,20 m de profundidade, denominadas de amostras do solo rizosférico. As raízes utilizadas para coleta do solo rizosférico possuíam de um a dois milímetros de espessura. As raízes foram levadas ao laboratório, onde foram secas ao ar e após, com o auxílio de peneiras e pincéis, tiveram o solo separado e coletado. As amostras deformadas foram secadas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA).

2.2 Análises laboratoriais

Para a dispersão químico/mecânica e coleta da fração argila foram pesadas 10 g de TFSA, nas quais foi oxidada a matéria orgânica à quente (40°C) com água oxigenada 5%. Posteriormente, em cada amostra foram adicionados 100 mL de água destilada pelo modo osmótico e 15 g de NaCl. As amostras foram submetidas a oito horas de agitação mecânica, sendo ultrassonadas por um minuto duas vezes durante este período. Na sequência, as amostras foram tamisadas ainda úmidas, a 50 µm. A fração maior que 50 µm, correspondente à fração areia, foi seca em estufa e pesada. A fração menor que 50 µm foi dispersa por agitação em 100 mL de NaCl 1 mol L⁻¹ durante 6 horas, sendo ultrassonadas uma vez por um minuto durante este período. A operação anterior foi repetida quatro vezes. O excesso de NaCl foi eliminado após decantação e a suspensão saturada com Na⁺ foi lavada através de diálise em água destilada pelo modo osmótico. Esta fração foi transferida para provetas de 1000 mL e mantida em uma sala com temperatura constante de 20 °C. Após, as argilas foram extraídas das provetas por sifonamento de 20 cm da solução após sedimentação de 16 horas a 20 °C. Foram realizadas em torno de 12 extrações por amostras. O que restou na proveta após os dias de coleta corresponde à fração silte, o qual foi pesado após secagem em estufa. A fração argila também foi seca em estufa à 60 °C, pesada e moída (Hubert et al, 2012).

O carbono orgânico total (COT) do solo foi realizada na TFSA por combustão seca em analisador de carbono SHIMADZU TOC-V. O teor de Fe e Al relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d e Al_d) foi extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB-Na) a 80 °C (Mehra e Jackson, 1960) na fração argila. A fração argila coletada após a extração com DCB-Na, foi submetida à lavagem através de diálise em água destilada pelo modo osmótico, foi seca e pesada. Uma parte da argila foi fracionada em três sub frações infra micrométricas com uso de centrífuga (Laird et al., 1991; Hubert et al., 2009, 2012).

A proporção entre os óxidos de ferro hematita (Hm) e goethita (Gt) foi estimada a partir de curvas obtidas por um espectrofotômetro ultravioleta-visível-infravermelho Cary 5000 (Varian Inc., Palo Alto, CA) em amostras finamente trituradas em almofariz de ágata (Barrón et al., 2000). As assinaturas espectrais obtidas pela espectroscopia foram analisadas pela técnica do contínuo removível (Clark & Roush, 1984), onde foram utilizadas as bandas 415-450 nm para a Gt e 535-590 nm para Hm (Bahia et al., 2015).

A área superficial específica (ASE) da TFSA foi estimada pelo método de adsorção de água (Quirk, 1955). Amostras de 1,0 g de TFSA foram colocadas em vidros pesa filtro previamente pesados. As amostras foram submetidas a uma atmosfera de 0% de umidade (UR = 0%) pelo período de 12 dias em dessecadores contendo pentóxido de fósforo, sendo posteriormente pesadas. Após, pelo mesmo período, as amostras foram submetidas a uma atmosfera de 20% de umidade (UR = 20%) em dessecadores contendo uma pasta de acetato potássico, sendo novamente pesadas. Considerando que 1 molécula de água recobre 0,108 nm², a ASE foi calculada conforme a seguinte equação:

$$ASE \text{ m}^2 \text{ g}^{-1} = n^{\circ} \text{ Avogadro } (6,02214 \times 10^{23}) \times 0,108 \text{ nm}^2 \times (\text{g água adsorvida/g amostra})$$

A suscetibilidade magnética (χ) foi determinada utilizando 2 cm³ de amostra de TFSA previamente moída em gral de ágata em um susceptíbilmetro MS2 (Bartington Instruments Limited, Witney, UK) acoplado a um sensor de laboratório MS2B em baixa frequência (0,47 kHz) (Dearing, 1999).

As análises estatísticas foram realizadas com o software R (R Core Team, 2015), aplicando o teste de Tukey a 5% de probabilidade para a comparação de médias.

3. Resultados e Discussão

Conforme esperado, alterações texturais não são comuns em curto e médio prazo por mudanças no uso do solo. Nas amostras de solo representativas da totalidade de cada camada não foram constatadas alterações na distribuição granulométrica entre os solos no campo e floresta (Tabela 1). Sob ambos os usos, os teores de argila aumentaram em profundidade, com as classes texturais variando de franco-argilo-arenosa nas três primeiras camadas a argila e franco-argilosa nas camadas mais profundas, em consonância com o processo de lessivagem e com a classificação do solo da área como Argissolo. Por outro lado, o solo rizosférico no floresta apresentou uma granulometria mais arenosa (classe textural franca) em relação ao solo rizosférico no campo (classe textural franco-arenosa), com redução dos teores de silte e argila. Em Yuxing et al. (2020) também foi observado uma diminuição nos teores de argila em solos cultivados por até 15 anos com *Eucalyptus* spp. Esse resultado sugere um ambiente intempérico mais agressivo próximo a rizosfera das plantas de Eucalipto, conforme evidenciado pelos menores valor de pH no solo sob floresta encontrados em Korchagin (2019).

Tabela 1. Atributos do solo ao longo das camadas de solo sob campo, florestamento de *Eucalyptus* spp., e no solo rizosférico da vegetação de campo e de plantas de Eucalipto.

Profundidade (m)	Areia	Silte	Argila	COT	Fe _d	Al _d	Hm/ (Hm+Gt) *100
	----- (g kg ⁻¹) -----						
Campo natural							
0-0,10	546	202	252	2,0	34,0	7,6	39
0,10-0,20	530	204	266	1,4	90,7	12,8	47
0,20-0,40	463	220	317	1,2	77,3	15,6	52
0,40-0,60	230	240	530	0,8	90,1	14,6	63
0,60-0,80	242	406	350	0,5	Nd	Nd	61
Floresta de eucalipto							
0-0,10	578	191	213	1,4	35,4	6,8	52
0,10-0,20	561	206	229	1,0	51,3	9,6	62
0,20-0,40	463	195	340	0,9	75,5	10,3	69
0,40-0,60	348	263	447	1,0	63,0	10,9	77
0,60-0,80	290	298	411	0,6	Nd	Nd	77
Rizosferas							
0-0,20 Campo natural	357	461	230	Nd	Nd	Nd	26
0-0,20 Floresta de Eucalipto	563	206	187	Nd	Nd	Nd	46

COT: carbono orgânico total; Al_d: Alumínio ditionito; Fe_d: Ferro ditionito; Hm: hematita; Gt: goethita; Nd: Não determinado.
 Fonte: Autores.

Exceto na camada 0,00-0,10 m, os teores de Fe³⁺ e Al³⁺ relativos aos óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d e Al_d) diminuíram com a mudança do uso campo natural pela floresta. A substituição isomórfica do Fe³⁺ pelo Al³⁺ na estrutura dos

óxidos foi similar em todas as camadas, indicando uma homogeneidade do ambiente de formação dos mesmos (Inda e Kämpf, 2005). Possivelmente a redução da concentração de óxidos de ferro seja decorrente da acidificação do solo sob floresta de eucalipto e também devido à dissolução preferencial da hematita na presença de maior teor de C orgânico (Schwertmann, 1991; Inda e Kämpf, 2005; Gattullo et al., 2018).

Os resultados da razão $Hm/(Hm+Gt)$ indicam maiores proporções de goethita nas camadas mais superficiais e de hematita nas camadas mais profundas, onde há também, menor teor de carbono (Tabela 1). No solo sob Floresta, há uma tendência a um avermelhamento (maior teor de hematita), conforme indicado pela razão $Hm/(Hm+Gt)$ ao longo do perfil. Considerando o modelo de formação dos óxidos de ferro pedogênicos, o aumento da proporção de goethita nas camadas mais superficiais é decorrente dos maiores teores de umidade e C orgânico, os quais favorecem a formação de goethita em detrimento da hematita ou favorecem a dissolução preferencial da hematita (Bigham et al., 2002; Inda e Kämpf, 2005).

No solo rizosférico, a razão $Hm/(Hm+Gt)$ evidenciou um intenso processo de rubeficação (avermelhamento) no solo próximo a rizosfera das plantas de eucalipto, assim como na matriz do solo da floresta. Esse processo pode estar em parte relacionado à alteração do regime hídrico, a diminuição da umidade do solo com o florestamento favorece a desidratação e rearranjo interno da ferrihidrita e a consequente precipitação de hematita em detrimento da goethita (Bigham et al., 2002).

O fracionamento granulométrico da argila no solo sob campo indicou uma predominância da sub fração argila grossa (0,10-2,00 μm), com percentagem variando entre 64 e 75% das partículas menores que 2 μm (Tabela 2). A sub fração argila média (0,05-0,10 μm) variou entre 14 e 29%, enquanto a argila fina (<0,05 μm) variou entre 9 e 18%. As amplitudes das sub frações de argila no solo sob floresta foram semelhantes (55 a 73% para argila grossa; 17 a 29% para argila média e 10 a 16% para argila fina). Sob ambos os usos, se observou uma tendência de aumento em profundidade das sub frações menores da argila, mais pronunciado na camada 0,40-0,60 m, caracterizando o processo pedogenético de lessivagem, onde há o transporte de material mais fino para as camadas mais profundas do solo. O incremento mais pronunciado dessas sub frações menores no solo floresta em relação ao campo se deve, possivelmente, ao uso de escarificação, o qual associado a oxidação da matéria orgânica favorecem a dispersão e o processo de lessivagem da argila em profundidade (Araújo et al, 2004). No solo rizosférico do campo, a sub fração argila grossa constituiu 73% da argila total, com as sub frações média e fina tendo somado 27%. Já no solo rizosférico da floresta, se verificou uma redução da sub fração argila grossa para 66% e um incremento das sub frações menores para 34%. Esse resultado colabora com a ocorrência sugerida de um ambiente mais intempérico na rizosfera da floresta em relação ao campo, conforme verificado anteriormente para as frações areia, silte e argila. Comparando-se as mesmas profundidades, com exceção do solo rizosférico, não foi possível observar efeito da floresta sobre as sub frações da argila em relação ao solo do campo.

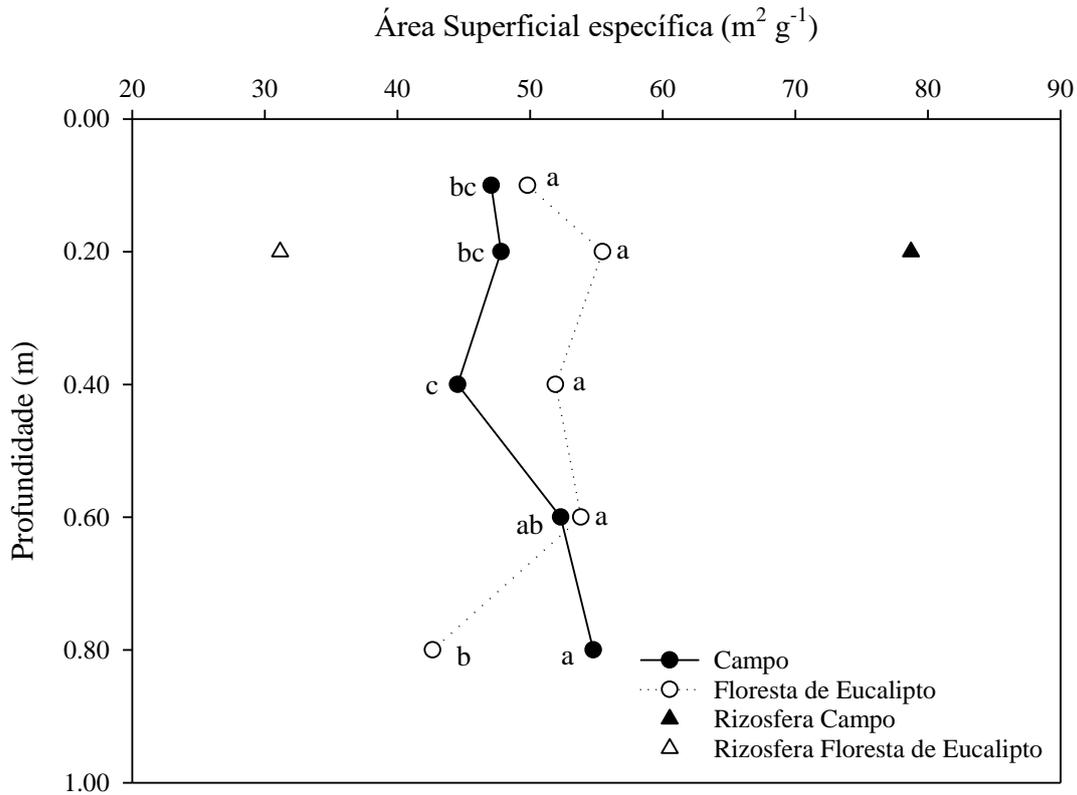
Tabela 2. Distribuição granulométrica da fração argila em argila fina (<0,05 µm), média (0,05-0,1 µm) e grossa (0,1 -2 µm).

Profundidade (m)	0,1 -2 µm	0,05-0,1 µm %	<0,05 µm
Campo			
0,00-0,10	75,19	13,53	11,28
0,10-0,20	72,18	17,29	10,53
0,20-0,40	73,64	17,05	9,30
0,40-0,60	64,00	18,40	17,60
Floresta			
0,00-0,10	72,66	16,55	10,79
0,10-0,20	70,07	17,52	12,41
0,20-0,40	66,91	20,14	12,95
0,40-0,60	55,07	29,21	15,72
Rizosferas			
Campo*	73,23	14,17	12,60
Floresta*	66,67	19,44	13,89

* O solo correspondente as rizosferas do campo e da floresta foram coletadas na profundidade de 0,00 a 0,20 m. Fonte: Autores.

Após teste de Tuckey foi verificado que não há diferenças significativas quando comparados os tratamentos campo e floresta para os valores de ASE (Figura 2). Porém, quando analisadas as diferenças entre profundidades dentro do mesmo uso do solo, é possível observar que: No campo a ASE se mantém igual para as profundidades 0 – 0,10 m a 0,10 – 0,20 m, diminuindo em 0,20 a 0,40 m e aumentando na profundidade 0,40 – 0,60 m e 0,60 – 0,80 m devido à translocação preferencial de partículas de argila fina pelo processo de lessivagem. Tal comportamento não pode ser observado na floresta, pois o valor da ASE das partículas se mantém igual de 0 -0,10 m até a profundidade de 0,40 – 0,60 m, diminuindo apenas na última camada analisada. Essa diminuição da ASE das partículas na camada 0,60 – 0,80 m de profundidade pode estar relacionada a um ambiente mais intempérico na proximidade das raízes das plantas do eucalipto (Korchagin et al., 2019), o que pode promover a dissolução seletiva de algumas partículas (Chaves, 2015).

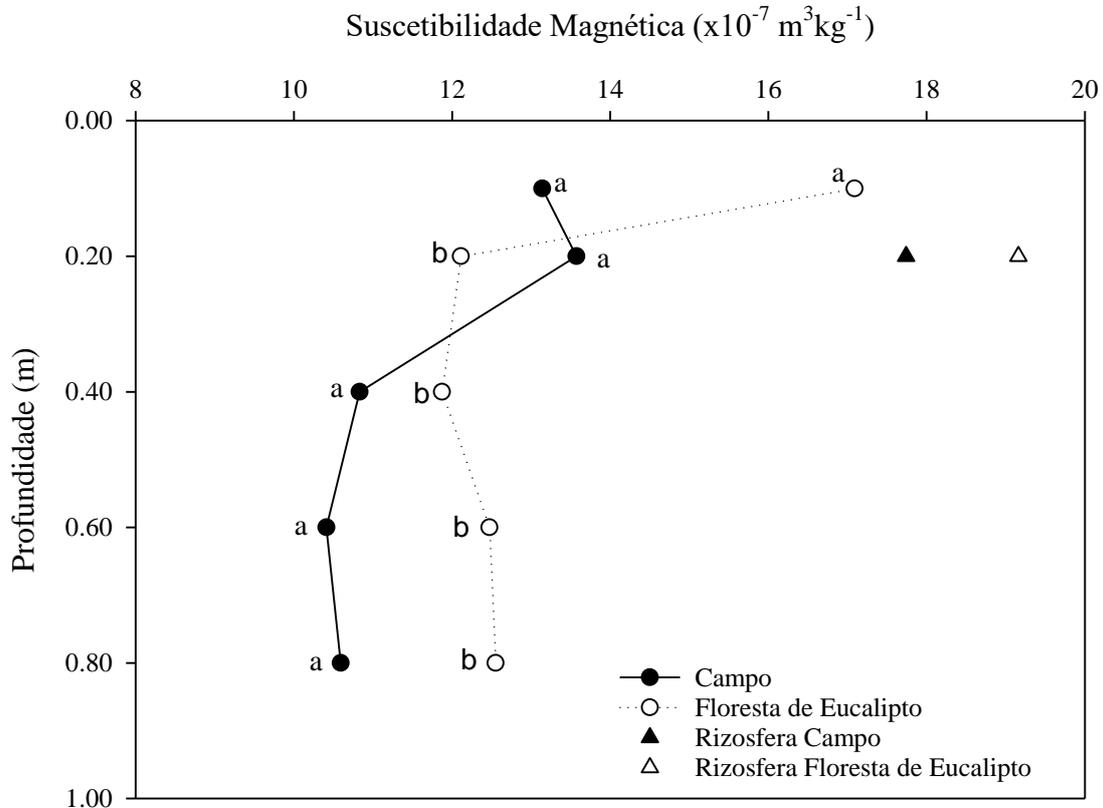
Figura 2. Área Superficial específica dos solos do campo e floresta. Foi realizado teste de Tuckey à 5% de confiança.



Fonte: Autores.

Para os valores de χ o teste de comparação de médias não expressou diferença significativa em profundidade para os solos do campo. No entanto, para os solos de floresta o valor de χ na camada de 0,00 à 0,10 m diferiu das demais (Figura 3). Os valores de χ dos solos da rizosfera da floresta ($19,16 \times 10^{-7} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) foram levemente mais elevados que os valores dos solos do campo ($17,74 \times 10^{-7} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$). Esses resultados de χ , refletem e concordam com os teores de areia, carbono, razão $\text{Hm}/(\text{Hm}+\text{Gt})$. Esse aumento da χ em solos da floresta em superfície e também em solo rizosférico, pode ser explicado pelo maior teor de areia, onde encontram-se o mineral ferrimagnéticos magnetita (Dearing, 1999). O elevado valor de χ nesta camada, também está relacionado com a maior razão $\text{Hm}/(\text{Hm}+\text{Gt})$ nos solos superficiais dos solos da floresta, sendo consistente com o modelo de formação pedogênica de minerais de óxido de floresta em solos aeróbios (Ramos et al., 2021). O menor valor de χ dos solos do campo em superfície, também pode ser explicado pelo maior teor de carbono (Tabela 1). A matéria orgânica possui comportamento diamagnético, ou seja, χ negativa ou fraca, podendo mascarar os resultados (Dearing, 1999).

Figura 3. Suscetibilidade Magnética na TFSA dos solos do campo nativo e floresta de eucalipto. Foi realizado teste de Tuckey à 5% de confiança.



Fonte: Autores.

4. Conclusão

Após 17 anos de florestamento de área de campo natural com floresta comercial de *Eucalyptus* spp. Foi possível observar as seguintes alterações:

Com relação à distribuição granulométrica, não ocorre mudança na proporção das frações areia, silte e argila quando considerado o solo total. No solo rizosférico, diminuem os teores das frações silte e argila.

No solo rizosférico é possível observar os valores suscetibilidade magnética mais elevados em relação aos demais solos, onde também ocorreu um avermelhamento constatado através da razão $Hm/(Hm+Gt)$. Ademais, os resultados da suscetibilidade magnética foram capazes de refletir os teores de areia e carbono diante seu comportamento em profundidade.

A área superficial específica diferiu em função da profundidade amostrada, e não difere estatisticamente em função do tipo de uso do solo (campo e floresta).

Agradecimentos

Aos colegas e servidores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Université de Poitiers e Universidad de Córdoba pelas contribuições para com este estudo e aos órgãos de fomento CAPES e CNPq pelo auxílio financeiro.

Referências

Ageflor. (2020). *A indústria de base florestal no Rio Grande do Sul 2020*. <http://www.ageflor.com.br/noticias/wp-content/uploads/2020/12/O-Setor-de-Base-Florestal-no-Rio-Grande-do-Sul-2020-ano-base-2019.pdf>

- Almeida, J. Á., Torrent, J. & Barrón, V. (2003). Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 985-1002.
- Amaral, F. H. C., Cabral Neto, A., Curi, N., Inda, A. V. & Araujo, E. F. (2015). Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação de macronutrientes. *Scientia Forestalis (IPEF)*, 43 (108), 979-991.
- Araújo, M. A. et al. (2004). Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférrico após treze anos de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, (3), 495-504.
- Azevedo, A. C., Kämpf, N. & Bohnen, H. (1996). Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 20, 191-198.
- Bahia, A. S. R. S., Marques Jr., J. & Siqueira, D. S. (2015). Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. *Geoderma Regional*, 5, 150–156.
- Barrón, V., Mello, J. W. V. & Torrent, J. (2000). Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. In Novais, R. F., Alvarez, V. H. & Schaefer, C. E. G. R. (Eds.), *Tópicos em ciência do solo*. (139-162) Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Bertolazi, V. T., Inda, A. V., Caner, L., Martins, A. P., Vaz, M. A. B., Bonnet, M., Anghioni, I. & Carvalho, P. C. F. (2017). Impact of an integrated no-till soybean-beef cattle production system on Oxisol mineralogy in southern Brazil. *Applied Clay Science*, 149 (1), 67-74.
- Bigham, J. M., Fitzpatrick, R. W. & Schulze, D. G. (2002). Iron Oxides. In J. B. Dixon and D. G. Schulze (Ed.), *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. (pp. 323-366). Madison, WI: Soil Science Society America Book Series. Cavenage, A., Moraes, M. L. T., Alves, M. C., Carvalho, M. A. C.,
- Freitas, M. L. M. & Buzetti, S. (1999). Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 23 (4), 997-1003.
- Chaves, E., Pedron, F. A., Melo, V. F. & Dalmolin, R. S. D. (2015). Reserva mineral de K por diferentes métodos em Argissolos subtropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 1088-1099.
- Clark, R. N. & Roush, T. L. (1984). Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, 89, 6329–6340.
- CPRM - Serviço geológico do Brasil. (2006). *Relatório anual 2013*. CPRM.
- Dearing, J. A. (1999). *Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 system* (2a ed.). Chi Publishing.
- Fink, J. R., Inda, A. V., Almeida, J. A., Bissani, C. A., Giasson, E. & Nascimento, P. C. (2014). Chemical and mineralogical changes in a Brazilian Rhodic Paleudult under different land use and managements. *Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)*, 38, 1304-1314.
- Gama-Rodrigues, E. F. & Gama-Rodrigues, A. C. (2008). Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: Santos, G. A., Silva, L. S., Canellas, L. P. & Camargo, F. O. (Eds.), *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. (pp. 1-12). (2a ed.), Metropole Editora LTDA.
- Gattullo, C. E., Pii, Y., Allegretta, I., Medici, L., Cesco, S., Mimmo, T. & Terzano, R. (2018). Iron mobilization and mineralogical alterations induced by iron-deficient cucumber plants (*Cucumis sativus*L.) in a calcareous soil. *Pedosphere*, 28, 59–69.
- Gmach, M. R., Cherubin, M. R., Kaiser, K. & Cerri, C. E. P. (2020). Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. *Scientia Agricola*, 77 (3), e20180164.
- Hubert, F. et al. (2009). Advances in characterization of soil clay mineralogy using X-ray diffraction: from decomposition to profile fitting. *European Journal of Soil Science*, 60 (6), 1093-1105.
- Hubert, F., Caner, L., Meunier, A. & Ferrage, E. (2012). Unraveling complex < 2 µm clay mineralogy from soils using X-ray diffraction profile modeling on particle-size sub-fractions: Implications for soil pedogenesis and reactivity. *American Mineralogist*, 97 (2-3), 384-398.
- Inda, A. & Kämpf, N. (2005). Goethite and hematite variability via reductive dissolution in soils from tropical and subtropical regions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 851-866. Inda, A. V., Torrent, J., Barrón, V. & Bayer, C. (2010). Aluminum hydroxy-interlayered minerals and chemical properties of a subtropical Brazilian Oxisol under no-tillage and conventional tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34 (1), 33-41.
- Inda, A. V., Torrent, J., Barrón, V., Bayer, C. & Fink, J. R. (2013). Iron oxides dynamics in a subtropical Brazilian Paleudult under long-term no-tillage management. *Scientia Agricola*, 70, 48-54.
- Kämpf, N. & Curi, N. (2000). Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In R. N. Novais, V. H. Álvarez, & C. E. G. R. Schaefer (Eds.), *Tópicos em ciência do solo* (pp.107–138). Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Kämpf, N. & Curi, N. (2003). Argilominerais em solos brasileiros. In: Curi, N. & Kämpf, N. (Eds.), *Tópicos em ciência do solo*. (pp. 1-54) Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Kochargin, J., Bortoluzi, E. C., Morteale, D. F., Petry, C. & Caner, L. (2019). Evidences of soil geochemistry and mineralogy changes caused by eucalyptus rhizosphere. *Catena*, 175, 132–143.
- Laird, D. A. et al. (1991) Chemistry of smectitic and illitic phases in interstratified soil smectite. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 55 (5), 1499-1504.
- Leite, L. F. C. (2002). *Compartimentos e dinâmica da matéria orgânica do solo sob diferentes manejos e sua simulação pelo Modelo Century*. Tese (doutorado em solos e nutrição de plantas) Universidade Federal de Viçosa.

- Lopes, S. E. et al. (2006). Compactação de um Latossolo Submetido ao Tráfego do Clambunk. *Scientia Forestalis*, 2006, 72, 23–28.
- Maluf, J. R. T. (2000). Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 8 (1), 141-150.
- Mazurana, M., Levien, R., Inda, A. V., Conte, O., Bressani, L. A. & Müller, J. (2017). Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 41, 60-71.
- Mehra, O. P. & Jackson, M. L. (1960). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7, 317- 327.
- Officer, S. J., Tillman, R. W., Palmer, A. S. & Whitton, J. S. (2006). Variability of clay mineralogy in two New Zealand steep-land topsoils under pasture. *Geoderma*, 132 (3-4), 427-440.
- Quirk, J. P. (1955). Significance of surface areas calculated from water vapour sorption isotherms by use of the Bet equation. *Soil Science*, 80 (6), 423-430.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna: 2015. Available at: <https://www.R-project.org/>.
- Ramos, P. V., Inda, A. V., Barrón, V., Teixeira, D. D. B., & Marques Jr., J. (2021). Magnetic susceptibility in the prediction of soil attributes in southern Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, 1–15.
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em ciência do solo (pp 49-134)*, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Sampietro, J. A., & Lopes, E. S. (2016). Compactação de um Cambissolo causada por máquinas de colheita florestal espacializada com geostatística. *Floresta*, 46, 307-314.
- Santos, H. G. et al. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. (5a ed.), Embrapa.
- Schwertmann, U. (1991). Solubility and dissolution of iron oxides. *Plant and Soil*, 130, 1-25.
- Severo, F. F., Aita, N. T., Marques, L. G. & Silva, L. S. (2017). Isotopic abundance of ¹³C and contribution of eucalyptus biomass to soil organic matter conversion. *Ciência Rural*, 47: 1-7.
- Silva Neto, L. F., Inda, A. V., Bayer, C., Dick, D. P. & Tonin, A. T. (2008). Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1873-1881.
- Silva, S. R., Barros, N. F., Costa, L. M., Mendonça, E. S., & Leite, F. P. (2007). Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um forwarder nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 31 (2), 371-377.
- Silva, M. A., Silva, M. L. N., Curi, N., Oliveira, A. H., Avanzi, J. C. & Norton, L. D. (2014). Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations. *Ciência e Agrotecnologia*, 38 (2), 160-172.
- Tomasi, C. A., Inda, A. V. & Dick, D. P. (2012a). Substâncias húmicas em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. *Ciencia Rural*, 42 (12), 2180- 2184.
- Tomasi, C. A., Inda, A. V., Dick, D. P., Bissani, C. A. & Fink, J. R. (2012b). Atributos químicos e área superficial específica em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. *Ciência Rural*, 42, 2172-2179.
- Vezeani, F. M & Mielniczuk, J. (2009). Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33 (4), 743-755.
- Vezeani, F. M. & Mielniczuk, J. (2011). *O solo como sistema*. Ed. Dos autores.
- Wang, C., Masoudi, A., Wang, M., Yang, J., Yu, Z. & Liu, J. (2021). Land-use types shape soil microbial compositions under rapid urbanization in the Xiong'an New Area, China. *Science of the Total Environment*, 777, 145976.
- Yuxing X. B., Apeng, D., Zhichao, W., Wankuan, Z., Chao, L. & Lichao, W. (2020). Effects of different rotation periods of Eucalyptus plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity. *Forest Ecology and Management*. 456, 117683.