

CONDIÇÃO ESTRUTURAL DE UM ARGISSOLO NO RIO GRANDE DO SUL, EM FLORESTA NATIVA, EM PASTAGEM CULTIVADA E EM POVOAMENTO COM EUCALIPTO

STRUCTURAL CONDITION OF AN ALFISOL IN RIO GRANDE DO SUL STATE, UNDER NATIVE FOREST, CULTIVATED PASTURE AND EUCALYPT

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki¹ Cláudia Liane Rodrigues de Lima²
Dalvan José Reinert³ José Miguel Reichert³ Clênio Nailto Pillon⁴

RESUMO

Objetivou-se definir limites críticos dos atributos físico-hídricos em áreas sob floresta e pastagem e avaliar a intensidade de compactação desses usos em um Argissolo Vermelho distrófico no Sul do Brasil. Os usos do solo constituíram-se de: Floresta - composta por espécies arbóreas e arbustivas; Pastagem - com cinco anos de idade, constituída de braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) consorciada com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium* sp.); Eucalipto 20 - povoamento de *Eucalyptus saligna* com vinte anos de idade, sendo realizado o preparo convencional do solo para implantação do povoamento; Eucalipto 4,5 - plantio clonal de *Eucalyptus saligna* conduzido em 2ª rotação, com 4,5 anos de idade. Foram avaliadas a condutividade hidráulica do solo saturado, a porosidade (macro, micro e total) e a densidade do solo. O eucalipto tem potencial para ser utilizado em áreas de recuperação, sem objetivo comercial. A compactação aumenta a densidade e diminui a macroporosidade e porosidade total do solo até a camada de 0,40 m em eucalipto com fins comerciais e até a camada de 0,10 m em pastagem. Valores baseados em restrições ao crescimento e rendimento de culturas anuais ou no intervalo hídrico ótimo têm potencial para serem utilizados para culturas perenes e pastagem.

Palavras-chave: compactação do solo; qualidade do solo; densidade e porosidade; condutividade hidráulica.

ABSTRACT

This study aimed to define the critical limits of physico-hidric attributes to areas under forest and pasture and to evaluate the intensity of compression of these uses in a Hapludalf in South Brazil. The use of soils were: Native Forest – formed for arboreal species; Pasture – five years old, constituted of *Brachiaria brizantha* associated with *Paspalum lourai* and *Trifolium* sp.; Eucalipto 20 - *Eucalyptus saligna* with 20 years old, installed under conventional tillage; Eucalipto 4,5 - *Eucalyptus saligna* under 2nd rotation, 4.5 years old. It was evaluated the hydraulic conductivity, macro, micro and total porosity and bulk density. The eucalypt is a potential crop to be used in recovering degraded areas with no commercial objective. Soil compression increase bulk density and decrease macroporosity and total porosity until the layer of 0.40 m in eucalypt for commercial use and until 0.10 m in pasture. Values based on restriction and yield of annual crops or in the least limiting water range have potential to be used as restrictive values for perennial and pasture crops.

Keywords: soil compression; soil quality; bulk density and porosity; hydraulic conductivity.

1. Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor da Universidade Federal de Pelotas, Rua Gomes Carneiro 01, CEP 96010-610 Pelotas (RS). luis.suzuki@ufpel.edu.br
2. Engenheira Agrícola, Dr^a., Professora da Universidade Federal de Pelotas, Campus Universitário s/n, CEP 96010-900 Pelotas (RS). clrlima@yahoo.com.br
3. Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Av. Roraima 1000, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). dalvan@smail.ufsm.br / reichert@smail.ufsm.br
4. Engenheiro Agrônomo, Dr., Pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Rodovia BR 392, Km 78, Caixa Postal 403, CEP 96001-970 Pelotas (RS). pillon@cpact.embrapa.br

Recebido para publicação em 23/03/2010 e aceito em 27/01/2011

INTRODUÇÃO

Em áreas agrícolas a compactação do solo tem sido estudada, tendo a planta como resposta (SUZUKI et al., 2007; REICHERT et al., 2009). Quando se consideram áreas florestais, a resposta das plantas à compactação não é tão simples, pois, diferentemente das culturas anuais, as árvores apresentam um ciclo mais longo, estando sujeitas às variações climáticas e à ação antrópica durante vários anos.

A exploração florestal é um termo utilizado para definir um conjunto de operações, que se inicia com a abertura de acesso ao local de implantação da floresta finalizando com o transporte das árvores para as unidades de processamento (MARTINS et al., 1998). Tais operações podem afetar vários componentes do ecossistema, acarretando danos como a compactação do solo, a erosão e os prejuízos à vegetação, o que modifica o meio físico em diferentes escalas de intensidade.

Em áreas agrícolas ou florestais, a mecanização, parece ser a principal causa da compactação dos solos (REICHERT et al., 2007), determinando as relações entre ar, água e temperatura do solo, que influenciam diretamente na germinação e na emergência das plantas, no crescimento e no desenvolvimento das raízes e plantas (LETEY, 1985).

A mecanização tem sido a responsável pela intensa deterioração das condições físicas do solo, pois o tráfego excessivo, sem o controle da umidade, contribui para a compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo exagerado número de operações, como pelo tráfego do trator sobre o solo (BELTRAME e TAYLOR, 1980), quando a carga aplicada for superior à capacidade de suporte do solo (VEIGA et al., 2007).

A compactação do solo tem sido constatada nos diferentes sistemas de manejo: plantio direto (GENRO JUNIOR et al., 2004), plantio convencional (ALVES e SUZUKI, 2004), pastagem (LANZANOVA et al., 2007) e silvicultura (FERNANDES e SOUZA, 2003). Em áreas agrícolas esse problema tem sido extensivamente estudado, mas em áreas sob silvicultura ainda há poucas informações (FERNANDES e SOUZA, 2001). Valores críticos ou restritivos ao crescimento têm sido sugeridos para culturas anuais; contudo, para culturas perenes, como eucalipto, ainda não há indicações.

Em áreas onde ocorrem plantios

homogêneos de espécies arbóreas a compactação é mais complexa do que nos demais manejos, pois as raízes das árvores permanecem e aplicam forças mecânicas por longos períodos de tempo, comparado às culturas anuais; a compactação causada pelas operações mecanizadas é elevada; a derrubada de grandes árvores impõe carga única no solo; as máquinas utilizadas na colheita podem ser muito pesadas e, combinadas com o arraste e levantamento dos troncos, podem exercer grandes pressões no solo; algumas operações de colheita, como o corte e arraste, podem alterar o solo; e a compactação pode afetar a quantidade e a qualidade da água (GREACEN e SANDS, 1980), através do assoreamento de rios e lagos. Somado a isso, os solos (SILVA et al., 2006; SUZUKI et al., 2007) e as culturas (FOLONI et al., 2006; REICHERT et al., 2009) respondem diferentemente à compactação.

Tem-se verificado, portanto, uma degradação da qualidade do solo, causada pelas práticas inadequadas de manejo. Nesse sentido, uma possibilidade de avaliar a qualidade do solo para o crescimento das espécies perenes seria a comparação das áreas de culturas perenes com áreas que ainda não foram submetidas à ação antrópica, como uma mata, ou utilizar os valores já existentes na literatura para culturas anuais e aplicá-los para culturas perenes.

O objetivo deste estudo foi definir limites críticos de características físico-hídricas para áreas sob floresta e pastagem, e avaliar a intensidade de compactação desses usos em um Argissolo Vermelho distrófico no Sul do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Butiá, situado na região fisiográfica Serra do Sudeste (Escudo Rio-Grandense) do Estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 30°06'06" de latitude Sul e 51°52'18" de longitude Oeste. Pelo sistema de Köppen o clima da região é do tipo "Cfa" – Clima Subtropical, úmido, sem estiagem. A temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C e a do mês menos quente é de 3 a 18 °C. O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2006) Tb A moderado, textura média/argilosa com cascalhos, relevo suave ondulado e ondulado, e substrato granito. Os usos e suas características foram os seguintes:

a) Floresta: floresta antropizada constituída

por espécies arbóreas e arbustivas com altura de aproximadamente quatro metros, sendo utilizada como abrigo pelos bovinos durante cinco anos.

b) Pastagem: pastagem com cinco anos de idade, constituída de braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) consorciada com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium sp.*). A pastagem foi instalada em uma área de 1200 ha sob preparo convencional, no ano de 2001. Antes do plantio da pastagem, a área foi constituída por floresta natural e, posteriormente, foi utilizada com pastagem e soja por mais de dez anos.

c) Eucalipto 20: povoamento de *Eucalyptus saligna* com vinte anos de idade, sendo realizado o preparo convencional do solo para implantação do povoamento no ano de 1986. Anterior ao plantio do eucalipto a área foi constituída por pastagem durante mais de quatro anos.

d) Eucalipto 4,5: plantio clonal de *Eucalyptus saligna* conduzido em 2ª rotação (plantio feito nas entrelinhas do plantio original), com 4,5 anos de idade. O plantio original ocorreu em 1993, com preparo do solo em faixa e escarificador de três hastes com profundidade de atuação de aproximadamente 0,30 m. A colheita do eucalipto no primeiro corte, aos 8,5 anos de idade, foi feita manualmente com motosserra e a extração da madeira realizada com Forwarder Valmet 890 com capacidade de carga de 18 Mg, sem queima do resíduo vegetal. O tráfego para colheita do eucalipto no primeiro corte foi aleatório, com número de passadas podendo chegar a 16. O segundo plantio foi feito nas entrelinhas no ano de 2002. Antes do plantio original ocorrido em 1993, a área foi utilizada com soja e pastagem por mais de dez anos.

As áreas de coleta foram localizadas próximas umas das outras para reduzir a variabilidade dos atributos do solo, devido ao relevo suave ondulado. Os pontos de coleta das áreas sob floresta, pastagem e eucalipto 20 estavam em uma altitude de aproximadamente 126 m, enquanto a área de eucalipto 4,5 em uma altitude de aproximadamente 140 m. Na floresta, as coletas foram realizadas em um ponto de difícil acesso aos animais devido à arquitetura das espécies arbóreas e arbustivas; contudo, devido à possibilidade dos bovinos conseguirem ter acesso a esse ponto de coleta nos períodos mais secos, essa área foi denominada de floresta antropizada. No eucalipto 4,5 as coletas foram feitas na entrelinha da 1ª e 2ª rotação, entre quatro árvores.

No mês de setembro do ano de 2006, foram

realizadas as coletas de amostras com estrutura alterada e preservada, sendo abertas três trincheiras para coleta nas camadas de 0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60 e 0,60 a 1,00 m.

A coleta das amostras com estrutura alterada para determinação da distribuição do tamanho de partículas do solo foi realizada em três trincheiras dentro de cada área e, no laboratório, foram feitas duas repetições para cada trincheira. A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1). A dispersão das amostras de solo foi realizada por agitador horizontal com 120 rpm durante 4 horas, utilizando vidros de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6 % (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de 1,11 g cm⁻³ (SUZUKI et al., 2004).

Para as amostras com estrutura preservada, coletaram-se em cada trincheira duas amostras por camada de solo, totalizando seis repetições. As amostras foram coletadas no centro da camada em cilindros com 5,0 cm de altura e 2,5 cm de diâmetro. Nessas amostras determinou-se a condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório, utilizando-se um permeâmetro de carga constante (LIBARDI, 2005), a macroporosidade, a microporosidade, a porosidade total (EMBRAPA, 1997) e a densidade do solo (BLAKE e HARTGE, 1986).

Os resultados foram analisados por contrastes ortogonais considerando 5 % de significância e análises de regressão e correlação de Pearson.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A floresta apresentou, em relação aos demais usos, menor variação da densidade e da macroporosidade ao longo do perfil (Tabela 2). As diferenças significativas de porosidade e de densidade entre os usos até a camada de 0,40 m indicam que as maiores modificações decorrentes do uso ocorreram nas camadas superiores (Tabela 3). A densidade na camada de 0,00 a 0,05 m e a porosidade total na camada de 0,00 a 0,10 m, na floresta, diferiram das demais camadas, fato que pode estar relacionado ao maior teor de matéria orgânica constatado nessa camada, conforme descrito por Antunes (2007) e ao acúmulo de resíduos e decomposição de raízes (Tabela 4). Através das características dos poros, Lima et al. (2005) verificaram que todos os

TABELA 1: Distribuição do tamanho das partículas do Argissolo Vermelho distrófico em estudo, no município de Butiá/RS.

TABLE 1: Particles size distribution of Alfisol in study, in Butiá, RS state.

Camada (m)	Cascalho	Areia			Silte	Argila
		Total	Grossa	Fina		
g kg ⁻¹						
Floresta						
0,00 - 0,05	8	407	245	162	191	402
0,05 - 0,10	12	385	210	175	193	422
0,10 - 0,20	12	379	213	166	187	434
0,20 - 0,40	23	345	198	147	179	476
0,40 - 0,60	48	293	171	122	165	542
0,60 - 1,00	47	277	167	110	144	579
Pastagem						
0,00 - 0,05	38	362	206	156	193	445
0,05 - 0,10	21	355	200	155	199	446
0,10 - 0,20	36	334	193	141	185	481
0,20 - 0,40	41	301	175	126	165	534
0,40 - 0,60	75	300	186	114	137	563
0,60 - 1,00	68	282	167	115	130	588
Eucalipto 20						
0,00 - 0,05	30	374	212	162	161	465
0,05 - 0,10	40	371	213	158	161	468
0,10 - 0,20	75	385	220	165	157	458
0,20 - 0,40	274	353	206	147	156	491
0,40 - 0,60	110	302	185	117	134	564
0,60 - 1,00	97	285	176	109	120	595
Eucalipto 4,5						
0,00 - 0,05	14	475	272	203	200	325
0,05 - 0,10	14	460	265	195	194	346
0,10 - 0,20	19	426	240	186	192	382
0,20 - 0,40	55	376	226	150	162	462
0,40 - 0,60	47	314	188	126	151	535
0,60 - 1,00	37	288	171	117	141	571

Em que: Cascalho = partículas de diâmetro entre 20 a 2 mm; areia total = partículas de diâmetro entre 2 a 0,05 mm; areia grossa = partículas de diâmetro entre 2 a 0,2 mm; areia fina = partículas de diâmetro entre 0,2 a 0,05 mm; silte = partícula de diâmetro entre 0,05 a 0,002 mm; argila = partículas de diâmetro menor que 0,002 mm.

poros de uma área de floresta foram oriundos de atividade biológica. Tal fato pode favorecer uma melhor agregação do solo e em consequência maior infiltração de água, como constatado por Alves et al. (2005).

Considerando as equações propostas por Reichert et al. (2007, 2009), que relacionam a densidade do solo quando o intervalo hídrico ótimo é igual a zero e a argila, a densidade crítica para esse solo, é de 1,45 Mg m⁻³, para um teor médio de argila de 482 g kg⁻¹. Este valor de densidade é superior ao observado na área de floresta. Isso significa que, para áreas visando à produção de culturas, a densidade do solo pode ser superior, comparada a uma condição natural, de mata ou campo nativo, por exemplo.

Na pastagem, a densidade da camada superficial (0,00 a 0,10 m) do solo foi superior a 1,45 Mg m⁻³ e diferiu das demais (Tabela 4). Nesta camada a macroporosidade foi inferior a 0,10 m³ m⁻³, considerado mínimo para o adequado desenvolvimento das plantas (GRABLE e SIEMER, 1968). Embora a compactação causada pelo pisoteio animal seja menos problemática de ser reduzida por se concentrar na superfície (SILVA et al., 2000), a taxa de infiltração de água pode ser afetada (LANZANOVA et al., 2007).

No eucalipto 20, a camada de 0,10 a 0,20 m apresentou densidade próxima a 1,45 Mg m⁻³, fato que pode estar associado à compactação causada pelo preparo do solo no momento de implantação da

cultura, como constatado em áreas agrícolas (ALVES e SUZUKI, 2004) e florestais (PREVEDELLO, 2008). A camada superior a 0,10 m diferiu das camadas inferiores, possivelmente devido ao maior teor de matéria orgânica constatado nessa camada por Antunes (2007) e ao acúmulo de resíduos e decomposição de raízes pela atividade biológica (Tabela 5).

O eucalipto 4,5 apresentou as maiores densidades em todas as camadas avaliadas e, nas

camadas superiores a 0,40 m, a densidade foi maior que 1,45 Mg m⁻³ e diferente dos demais usos (Tabela 3) e das camadas inferiores (Tabela 5). Como o solo foi revolvido apenas na linha de plantio da segunda rotação do eucalipto, a compactação causada pela colheita do 1º plantio permaneceu nas entrelinhas. A macroporosidade na camada de 0,00 a 0,10 m esteve próxima a 0,10 m³ m⁻³, fato que pode estar associado à concentração de raízes e aporte de matéria orgânica nessa camada.

TABELA 2: Características físicas do solo para os usos em um Argissolo Vermelho distrófico do município de Butiá/RS.

TABLE 2: Soil physical characteristics to the uses in an Alfisol in Butiá, in RS state.

Camada (m)	Usos			
	Floresta	Pastagem	Eucalipto 20	Eucalipto 4,5
Densidade do solo, Mg m ⁻³				
0,00-0,05	1,24	1,46	1,04	1,50
0,05-0,10	1,32	1,44	1,28	1,55
0,10-0,20	1,35	1,37	1,44	1,53
0,20-0,40	1,37	1,33	1,43	1,49
0,40-0,60	1,39	1,35	1,39	1,44
0,60-1,00	1,32	1,34	1,34	1,35
Macroporosidade, m ³ m ⁻³				
0,00-0,05	0,092	0,032	0,196	0,091
0,05-0,10	0,115	0,039	0,164	0,079
0,10-0,20	0,086	0,061	0,099	0,053
0,20-0,40	0,086	0,059	0,097	0,067
0,40-0,60	0,066	0,068	0,113	0,050
0,60-1,00	0,086	0,064	0,114	0,080
Microporosidade, m ³ m ⁻³				
0,00-0,05	0,395	0,378	0,252	0,311
0,05-0,10	0,349	0,365	0,30	0,307
0,10-0,20	0,335	0,345	0,337	0,312
0,20-0,40	0,339	0,357	0,314	0,313
0,40-0,60	0,340	0,344	0,312	0,331
0,60-1,00	0,346	0,349	0,337	0,340
Porosidade total, m ³ m ⁻³				
0,00-0,05	0,487	0,410	0,448	0,402
0,05-0,10	0,465	0,404	0,464	0,386
0,10-0,20	0,421	0,406	0,436	0,365
0,20-0,40	0,424	0,415	0,411	0,380
0,40-0,60	0,406	0,412	0,425	0,381
0,60-1,00	0,432	0,413	0,452	0,420
Condutividade hidráulica, mm h ⁻¹				
0,00-0,05	12,81	0,00	109,47	13,05
0,05-0,10	4,39	0,27	59,14	4,05
0,10-0,20	0,14	0,14	17,89	0,55
0,20-0,40	4,47	0,00	18,95	6,15
0,40-0,60	4,66	0,23	7,59	3,04
0,60-1,00	0,00	0,00	1,93	3,29

TABELA 3: Contrastes ortogonais e significância para os usos e camadas de um Argissolo Vermelho distrófico do município de Butiá/RS.

TABLE 3: Orthogonal contrasts and significance for the uses and the layers of an Alfisol in Butiá, RS state.

Contrastes	DS	Porosidade			K ₀₅
		Macro	Micro	Total	
0,00 a 0,05 m					
Floresta vs Pastagem	**	**	ns	**	ns
Floresta vs Eucalipto 20	**	**	**	**	**
Floresta vs Eucalipto 4,5	**	ns	**	**	ns
Pastagem vs Eucalipto 20	**	**	**	**	**
Pastagem vs Eucalipto 4,5	ns	**	**	ns	ns
Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5	**	**	**	**	**
0,05 a 0,10 m					
Floresta vs Pastagem	*	**	ns	**	ns
Floresta vs Eucalipto 20	ns	*	**	ns	**
Floresta vs Eucalipto 4,5	**	ns	**	**	ns
Pastagem vs Eucalipto 20	**	**	**	**	**
Pastagem vs Eucalipto 4,5	*	ns	**	ns	ns
Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5	**	**	ns	**	**
0,10 a 0,20 m					
Floresta vs Pastagem	ns	ns	ns	ns	ns
Floresta vs Eucalipto 20	**	ns	ns	ns	**
Floresta vs Eucalipto 4,5	**	*	*	**	ns
Pastagem vs Eucalipto 20	*	*	ns	*	**
Pastagem vs Eucalipto 4,5	**	ns	**	**	ns
Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5	**	**	**	**	**
0,20 a 0,40 m					
Floresta vs Pastagem	ns	ns	ns	ns	ns
Floresta vs Eucalipto 20	ns	ns	ns	ns	*
Floresta vs Eucalipto 4,5	**	ns	ns	**	ns
Pastagem vs Eucalipto 20	**	*	**	ns	**
Pastagem vs Eucalipto 4,5	**	ns	**	**	ns
Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5	*	ns	ns	**	*
0,40 a 0,60 m					
Floresta vs Pastagem	ns	ns	ns	ns	ns
Floresta vs Eucalipto 20	ns	**	*	ns	ns
Floresta vs Eucalipto 4,5	ns	ns	ns	ns	ns
Pastagem vs Eucalipto 20	ns	**	*	ns	ns
Pastagem vs Eucalipto 4,5	ns	ns	ns	ns	ns
Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5	ns	**	ns	*	ns
0,60 a 1,00 m					
Floresta vs Pastagem	ns	ns	ns	ns	ns
Floresta vs Eucalipto 20	ns	ns	ns	ns	ns
Floresta vs Eucalipto 4,5	ns	ns	ns	ns	*
Pastagem vs Eucalipto 20	ns	**	ns	**	ns
Pastagem vs Eucalipto 4,5	ns	ns	ns	ns	*
Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5	ns	*	ns	*	ns

Em que: DS = densidade do solo, K₀₅ = condutividade hidráulica do solo saturado. ns = não significativo, * = significativo a 5 %, ** = significativo a 1 %.

TABELA 4: Contrastes ortogonais e significância para as camadas de solo na área de floresta e pastagem de um Argissolo Vermelho distrófico do município de Butiá/RS.

TABLE 4: Orthogonal contrasts and significance to the soil layers in the forest and pasture of an Alfisol of Butiá, RS state.

Contraste	DS	Porosidade			K _{os}
		Macro	Micro	Total	
Floresta					
0,00-0,05 vs 0,05-0,10	*	ns	**	ns	ns
0,00-0,05 vs 0,10-0,20	**	ns	**	**	*
0,00-0,05 vs 0,20-0,40	**	ns	**	**	ns
0,00-0,05 vs 0,40-0,60	**	ns	**	**	ns
0,00-0,05 vs 0,60-1,00	*	ns	**	**	*
0,05-0,10 vs 0,10-0,20	ns	ns	ns	*	ns
0,05-0,10 vs 0,20-0,40	ns	ns	ns	*	ns
0,05-0,10 vs 0,40-0,60	*	**	ns	**	ns
0,05-0,10 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	*	ns
0,10-0,20 vs 0,20-0,40	ns	ns	ns	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,40-0,60	ns	ns	ns	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	ns	ns
0,20-0,40 vs 0,40-0,60	ns	ns	ns	ns	ns
0,20-0,40 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	ns	ns
0,40-0,60 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	ns	ns
Pastagem					
0,00-0,05 vs 0,05-0,10	ns	ns	ns	ns	ns
0,00-0,05 vs 0,10-0,20	**	ns	**	ns	ns
0,00-0,05 vs 0,20-0,40	**	ns	**	ns	ns
0,00-0,05 vs 0,40-0,60	**	*	**	ns	ns
0,00-0,05 vs 0,60-1,00	**	*	**	ns	ns
0,05-0,10 vs 0,10-0,20	*	ns	**	ns	ns
0,05-0,10 vs 0,20-0,40	**	ns	ns	ns	ns
0,05-0,10 vs 0,40-0,60	**	ns	**	ns	ns
0,05-0,10 vs 0,60-1,00	**	ns	*	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,20-0,40	ns	ns	ns	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,40-0,60	ns	ns	ns	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	ns	ns
0,20-0,40 vs 0,40-0,60	ns	ns	ns	ns	ns
0,20-0,40 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	ns	ns
0,40-0,60 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	ns	ns

Em que: DS = densidade do solo, K_{os} = condutividade hidráulica do solo saturado. ns = não significativo, * = significativo a 5 %, ** = significativo a 1 %.

TABELA 5: Contrastes ortogonais e significância para as camadas de solo na área de eucalipto 20 e eucalipto 4,5 de um Argissolo Vermelho distrófico latossólico do município de Butiá/RS.

TABLE 5: Orthogonal contrasts and significance to the soil layers in the eucalyptus 20 and eucalyptus 4.5 of an Alfisol of Butiá, RS state.

Contraste	DS	Porosidade			K _{0S}
		Macro	Micro	Total	
Eucalipto 20					
0,00-0,05 vs 0,05-0,10	**	ns	**	ns	*
0,00-0,05 vs 0,10-0,20	**	**	**	ns	**
0,00-0,05 vs 0,20-0,40	**	**	**	*	**
0,00-0,05 vs 0,40-0,60	**	**	**	ns	**
0,00-0,05 vs 0,60-1,00	**	**	**	ns	**
0,05-0,10 vs 0,10-0,20	**	**	ns	*	*
0,05-0,10 vs 0,20-0,40	*	**	ns	**	ns
0,05-0,10 vs 0,40-0,60	*	*	ns	**	*
0,05-0,10 vs 0,60-1,00	ns	*	ns	ns	**
0,10-0,20 vs 0,20-0,40	ns	ns	ns	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,40-0,60	ns	ns	ns	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,60-1,00	*	ns	ns	ns	ns
0,20-0,40 vs 0,40-0,60	ns	ns	ns	ns	ns
0,20-0,40 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	**	ns
0,40-0,60 vs 0,60-1,00	ns	ns	ns	ns	ns
Eucalipto 4.5					
0,00-0,05 vs 0,05-0,10	ns	ns	ns	ns	ns
0,00-0,05 vs 0,10-0,20	ns	**	ns	**	*
0,00-0,05 vs 0,20-0,40	ns	*	ns	*	ns
0,00-0,05 vs 0,40-0,60	ns	**	**	ns	*
0,00-0,05 vs 0,60-1,00	**	ns	**	ns	*
0,05-0,10 vs 0,10-0,20	ns	*	ns	ns	ns
0,05-0,10 vs 0,20-0,40	ns	ns	ns	ns	ns
0,05-0,10 vs 0,40-0,60	*	*	**	ns	ns
0,05-0,10 vs 0,60-1,00	**	ns	**	**	ns
0,10-0,20 vs 0,20-0,40	ns	ns	ns	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,40-0,60	*	ns	*	ns	ns
0,10-0,20 vs 0,60-1,00	**	*	**	**	ns
0,20-0,40 vs 0,40-0,60	ns	ns	*	ns	ns
0,20-0,40 vs 0,60-1,00	**	ns	**	**	ns
0,40-0,60 vs 0,60-1,00	ns	*	ns	**	ns

Em que: DS = densidade do solo, K_{0S} = condutividade hidráulica do solo saturado. ns = não significativo, * = significativo a 5 %, ** = significativo a 1 %.

A diferença de densidade entre as áreas está associada não apenas ao uso do solo, mas também, em menor proporção (devido ao baixo coeficiente de determinação = r^2), às diferenças de textura. Com decréscimo do teor de argila ($DS = 1,5759 - 0,0004$ Argila; $r^2 = 0,07^{**}$), e aumento da areia total ($DS = 1,1832 + 0,0005$ Areia total; $r^2 = 0,07^{**}$), houve incremento da densidade do solo.

O eucalipto 20 e a floresta apresentaram maior macroporosidade em todas as camadas avaliadas, devido à menor ação antrópica nessas áreas, ao desenvolvimento e decomposição de raízes em maiores profundidades, ao aporte de matéria orgânica e à ação de organismos.

Embora a textura do solo possa influenciar no tamanho de poros, não houve efeito significativo ($PT = 0,4037 + 0,00003$ Argila; $r^2 = 0,00^{ns}$; $PT = 0,4357 - 0,00004$ Areia total; $r^2 = 0,00^{ns}$), sendo a macroporosidade ($Macro = 0,3923 - 0,2224$ DS; $r^2 = 0,39^{**}$) e a porosidade total ($PT = 0,6960 - 0,2003$ DS; $r^2 = 0,46^{**}$) afetadas pelo uso do solo, sem efeito significativo na microporosidade ($Micro = 0,3036 - 0,0221$ DS; $r^2 = 0,01^{ns}$). Albuquerque et al. (2001) constataram que os macroporos foram mais sujeitos às mudanças impostas pelo manejo em área agrícola do que os microporos. Geralmente, a microporosidade é pouco sensível à compactação do solo, sendo o efeito do uso do solo na microporosidade relacionado à intensidade da compactação e textura ($Micro = 0,2999 + 0,00007$ Argila; $r^2 = 0,03^*$; $Micro = 0,3891 - 0,0001$ Areia total; $r^2 = 0,08^{**}$). A argila possui forma laminar e, com aumento do seu teor, existe um melhor ajuste entre as partículas, o que promove a redução da macroporosidade ($Macro = 0,1038 - 0,00004$ Argila; $r^2 = 0,00^{ns}$) e aumento da microporosidade ($Micro = 0,2999 + 0,00007$ Argila; $r^2 = 0,03^*$). Por outro lado, a areia possui um formato irregular, dificultando o ajuste entre as partículas e, nos espaços onde não ocorre contato entre as partículas de areia, formam-se os macroporos ($Macro = 0,0466 + 0,0001$ Areia total; $r^2 = 0,02^{ns}$).

A condutividade hidráulica foi influenciada pela densidade ($\text{Log } K_{0S} = 9,1355 - 5,3391$ DS; $r^2 = 0,19^{**}$) e pelo sistema poroso ($\text{Log } K_{0S} = -5,1130 + 16,0347$ PT; $r^2 = 0,12^{**}$), principalmente a macroporosidade ($\text{Log } K_{0S} = -1,0853 + 27,4057$ Macro; $r^2 = 0,43^{**}$) e em menor proporção pela microporosidade ($\text{Log } K_{0S} = 8,3978 - 20,3833$ Micro; $r^2 = 0,17^{**}$), enquanto a argila ($\text{Log } K_{0S} = 1,5952 + 0,0004$ Argila; $r^2 = 0,00^{ns}$) e areia total ($\text{Log } K_{0S} = 1,2923 + 0,0013$ Areia total; $r^2 = 0,00^{ns}$)

não influenciaram a condutividade. Geralmente, os macroporos, responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo, são os primeiros poros a serem destruídos no processo de compactação (GREACEN e SANDS, 1980; REICHERT et al., 2007).

Duas formas para obtenção de um valor crítico de condutividade hidráulica foram apresentadas por Reichert et al. (2007), sendo uma delas estabelecida a partir do valor de macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Dessa forma, pela equação $\text{Log } K_{0S} = -1,0853 + 27,4057$ Macro, obtém-se uma condutividade de $0,22 \text{ mm h}^{-1}$, valor inferior ao verificado por Suzuki et al. (2007) e Reichert et al. (2007, 2009), mas que representa as condições desse estudo. Embora o eucalipto 4,5 tenha apresentado o maior valor de densidade e menor macroporosidade em comparação aos demais usos, sua condutividade foi superior a $0,22 \text{ mm h}^{-1}$. Mesquita e Moraes (2004) afirmam que a presença de um “megaporo” em uma amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mas muito sua condutividade. Devido ao maior diâmetro das raízes de eucalipto, é possível que a presença de um megaporo tenha contribuído significativamente para os valores de condutividade hidráulica. A densidade do solo crítica às culturas anuais parece não afetar da mesma forma a cultura do eucalipto. Mesmo as raízes do eucalipto rompendo camadas compactadas, a funcionalidade dos poros para condução da água em maiores profundidades deve ser mais efetiva para que não ocorra escoamento superficial.

A intensidade e a profundidade de compactação do solo variaram com os diferentes usos. Tal fato pode ser atribuído às especificações da máquina e seu rodado (largura, tipo e pressão de inflação), condições do solo (umidade, consistência e teor de matéria orgânica), número de vezes em que o solo é trafegado e do seu histórico de pressões, além do manejo (REICHERT et al., 2007). No eucalipto 4,5 havia 12 Mg ha^{-1} de serrapilheira no momento das coletas de solo. Embora a presença de resíduos na superfície do solo possa dissipar a energia da compactação pelo tráfego de máquinas (BRAIDA et al., 2006), em áreas florestais é possível que a profundidade de compactação seja maior do que em áreas agrícolas ou pecuárias porque o peso de máquinas é maior, o tráfego durante a colheita é mais intenso e há possibilidade de uma maior umidade do solo devido ao sombreamento causado pela espécie florestal.

O eucalipto apresenta grande potencial para recuperação da estrutura do solo, como constatado

no eucalipto 20, que apresentou características físicas do solo semelhantes à floresta. No entanto, a estrutura do solo seria afetada negativamente pela colheita quando se trata de cultura comercial, como verificado no eucalipto 4,5. Mesmo com corte do eucalipto tendo sido realizado com motosserra, o maior impacto na estrutura do solo parece estar relacionado com a operação de retirada da madeira da área pelo tráfego intenso do Forwarder. Dias Junior et al. (2007) verificaram que a operação de colheita de eucalipto causou aumento da densidade após o tráfego do Forwarder. No entanto, oito anos após a colheita, o solo apresentava densidade semelhante aos valores anteriores ao tráfego, que aumentaram novamente devido à nova colheita.

CONCLUSÕES

a) Os diferentes usos influenciam distintamente as características físico-hídricas do solo. A compactação afeta negativamente a estrutura do solo até a camada de 0,40 m em área de eucalipto para fins comerciais e até a camada de 0,10 m em área de pastagem.

b) Considerando a estrutura do solo, o eucalipto possui potencial para ser utilizado em áreas de recuperação, sem objetivo comercial. Em áreas comerciais há possibilidade de compactação, após o tráfego de máquinas ou pisoteio animal.

c) Valores baseados em restrições ao crescimento e rendimento de culturas anuais, ou no intervalo hídrico ótimo são efetivos para eucalipto e pastagem (culturas visando à produção comercial).

d) O nível de compactação intermediário, presente na floresta e pastagem, é mais adequado para a estrutura do solo (porosidade e densidade).

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos e bolsistas da Embrapa Clima Temperado de Pelotas/RS, pelo auxílio nos trabalhos de campo e laboratório. À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudo durante o doutoramento do primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. **Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, v. 30, p. 167-180, 2005.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum**, v. 26, p. 27-34, 2004.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum**, v. 26, p. 27-34, 2004.
- ANTUNES, L. O. **Estoque e labilidade da matéria orgânica em um Argissolo sob sistemas de produção de eucalipto**. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2007.
- BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, v. 32, p. 59-62, 1980.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2nd. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.
- BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 605-614, 2006.
- DIAS JUNIOR, M. S. et al. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 257-264, 2007.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P. Compactação de solos florestais: uma questão para estudo. **Revista Árvore**, v. 25, p. 387-392, 2001.
- FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P. Compactação de um Latossolo Vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". **Revista Árvore**, v. 27, p. 279-284, 2003.
- FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 49-57, 2006.
- GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da

- resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 477-484, 2004.
- GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 32, p. 180-186, 1968.
- GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 18, p. 163-169, 1980.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1131-1140, 2007.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 2005. 335 p.
- LIMA, H. V. et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 677-684, 2005.
- MARTINS, S. S. et al. Impactos da exploração madeireira em florestas nativas sobre alguns atributos físicos do solo. **Revista Árvore**, v. 22, p. 69-76, 1998.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, p. 963-969, 2004.
- PREVEDELLO, J. **Preparo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. em Argissolo**. 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.
- SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; VILAS BOAS, J. E. B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 759-768, 2006.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 191-199, 2000.
- SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1159-1167, 2007.
- SUZUKI, L. E. A. S. et al. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. Anais... Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. CD-ROM
- VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 92, p. 104-113, 2007.