

IMPACTO DO FLORESTAMENTO COM *Pinus taeda* L. NA POROSIDADE E PERMEABILIDADE DE UM CAMBISSOLO HÚMICO¹

Simone Filipini Abrão², Deonir Secco³, Dalvan José Reinert⁴, José Miguel Reichert⁴ e Ângelo Augusto Ebling²

RESUMO – O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da introdução da espécie *Pinus taeda* L. nas propriedades físicas e qualidade de um Cambissolo Húmico de campo nativo. O trabalho foi realizado no Município de Cambará do Sul, RS, Brasil. Para isso, foram escolhidas duas áreas, uma em primeira rotação (RT1) e a outra em segunda rotação (RT2). Em cada povoamento foi avaliada conjuntamente, como testemunha, uma área de campo nativo adjacente. Em cada área foram abertas cinco trincheiras e coletadas amostras de solo em quatro camadas até 0,60 m de profundidade. As alterações nas propriedades físicas foram analisadas, avaliando-se: a granulometria, densidade e espaço poroso do solo, a condutividade hidráulica do solo saturado e a permeabilidade do solo ao ar. A estratégia de análise estatística foi comparar os dados referentes à RT1 e RT2 com as respectivas testemunhas, CN1 e CN2, comparando também as médias pelo teste “t”, de Student. A implantação de povoamentos de pinus não alterou a densidade nem a porosidade total, mas proporcionou aumentos médios de 145%, 436% e 172%, respectivamente, na macroporosidade, condutividade hidráulica e permeabilidade do solo ao ar na RT1 em relação ao CN1 na camada de 0,0-0,20 m e, respectivamente, de 157%, 640% e 111% para as mesmas variáveis da RT2 em relação ao CN2, na camada de 0,0-0,05 m. O povoamento com pinus melhorou a qualidade do solo, no que se refere à permeabilidade à água e ao ar.

Palavras-chave: Estrutura do solo; Condutividade hidráulica; Funcionalidade de poros.

IMPACT OF AFFORESTATION WITH *Pinus taeda* L. IN POROSITY AND PERMEABILITY OF A HAPLUMBREPT

ABSTRACT – The aim of this study was to evaluate the influence of the introduction of *Pinus taeda* L. in the physical properties and quality of a Haplumbrept, under native grassland. The study was conducted in Cambará do Sul-RS, Brazil. For this, two areas were chosen, one in first rotation (RT1) and the other in second rotation (RT2). For each stand one area of adjacent-native grassland was evaluated jointly, as control. In each area, 5 trenches were opened and soil samples were collected in four layers up to 0.60 m deep. Changes in physical properties were analyzed by determining particle size, density and pore space of soil, saturated soil hydraulic conductivity and permeability of soil to air. The strategy of statistical analysis was to compare the data on RT1 and RT2 with their respective controls, CN1 and CN2, also comparing means by Student “t” test. The deployment of pine stands did not alter the density or total porosity, but provided average increases

¹ Recebido em 09.07.2013 aceito para publicação em 02.10.2015.

² Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, PR - Brasil. E-mail: <simone_abrao@hotmail.com> e <aebbling@hotmail.com>.

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Engenharia Agrícola, Cascavel, PR - Brasil. E-mail: <dsecco43@hotmail.com>.

⁴ Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Solos, Santa Maria, RS - Brasil. E-mail: <dalvan@ccr.ufsm.br> e <reichert@ufsm.br>.



of 145%, 436% and 172% respectively for the macroporosity, hydraulic conductivity and permeability of soil to air on RT1 relative to CN1 in the 0.0-0.20 m and, respectively, 157%, 640% and 111% for the same variables in RT2 with respect to CN2 in the layer of 0.0-0.05 m. The stand with pine improved soil quality with regard to permeability to water and air.

Keywords: Soil structure; Hydraulic conductivity; Pore functionality.

1. INTRODUÇÃO

A espécie *Pinus taeda* L. é considerada de grande importância nos Estados Unidos da América e no Sul do Brasil, sendo cultivada nas terras mais altas da Serra Gaúcha e do Planalto Catarinense (MARCHIORI, 2005). Historicamente, uma das principais razões para a introdução do gênero *Pinus* no país foi a necessidade de produção da madeira para o abastecimento industrial, processamento mecânico, produção de madeira serrada, madeira laminada, confecção de painéis ou produção de celulose e papel.

A produtividade dos povoamentos florestais é consequência direta das condições ecológicas do local de plantio e do potencial das espécies em utilizar os recursos naturais disponíveis para o seu crescimento (SHIMIZU; SEBBENN, 2008). Dessa forma, aliado a práticas silviculturais adequadas, o pinus adaptou-se bem ao solo e ao clima da Região Sul, constituindo boa alternativa para suprir as demandas dos distintos setores industriais. Contudo, o avanço das culturas anuais e dos florestamentos tem sido objeto de estudos e discussões no que diz respeito aos impactos ambientais, principalmente em relação ao cultivo em áreas de maior suscetibilidade, como as de ocorrência de Cambissolo Húmico (NASCIMENTO, 2007).

Sabe-se que a remoção da vegetação natural geralmente causa grandes alterações edáficas, mas, no longo prazo, o que irá determinar as condições físicas, químicas e biológicas do solo serão a forma e o grau de perturbação antrópica (GONÇALVES, 2002). Para quantificação dessas alterações, geralmente são utilizados indicadores da qualidade do solo, definidos como propriedades mensuráveis capazes de influenciar a produção de culturas ou o desempenho de funções ambientais do solo. Entre os indicadores estão os atributos físicos, químicos e biológicos, os quais expressam a condição da qualidade do solo (DORAN; PARKIN, 1994; DEDECEK, 2008).

De modo geral, estudos relacionados à introdução do pinus têm indicado que a cultura proporciona

alterações físicas benéficas, mas alterações químicas desfavoráveis no solo. Porém, torna-se difícil prever se esses comportamentos se mantêm ao longo do tempo, pois a grande maioria das pesquisas relacionadas às alterações do solo não consideram seus efeitos nas sucessivas rotações. Além disso, ainda são escassos os estudos que avaliam as alterações promovidas no solo pela conversão do campo nativo em florestamentos com pinus e a influência na qualidade do solo. Assim, torna-se necessário avaliar os aspectos relativos aos atributos físicos do solo, tendo em vista a importância de considerá-los ao se avaliarem os impactos na estrutura do solo e, como consequência, na capacidade produtiva de áreas destinadas à produção florestal. Segundo Gonçalves (2002), a perda da qualidade da maioria dos solos brasileiros está intimamente relacionada à degradação de sua estrutura, portanto avaliações no sentido de medir as condições de espaço poroso, considerando o fluxo de água e ar, bem como a manutenção da matéria orgânica nesse meio, são fundamentais quando se requer avaliação da sustentabilidade de ecossistemas florestais.

Diante do exposto, este estudo teve por objetivo avaliar o impacto da introdução da espécie *P. taeda* em solo sob campo nativo na qualidade física do Cambissolo Húmico com diferentes rotações.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos locais de estudo e coleta de amostras de solo

O estudo foi realizado no Município de Cambará do Sul, RS, em um Cambissolo Húmico Aluminico típico (EMBRAPA, 2013), com clima tipo Cfb1 (Köppen), em povoamentos florestais de primeira e de segunda rotação de *Pinus taeda* e em campo nativo adjacente, adotado como testemunha. A área de estudo de primeira rotação (RT1), com coordenadas geográficas de 29°06' de latitude Sul e 50°11' de longitude Oeste, possui 20,13 ha plantados

com *P. taeda*. O plantio foi realizado sem adubação, após a marcação e coroamento manual.

A segunda área de estudo trata-se de uma área de reforma, ou seja, foi implantada onde já havia, anteriormente, o plantio com *P. taeda* e, portanto, de segunda rotação (RT2). Com coordenadas geográficas de 28°53' de latitude Sul e 50°07' de longitude Oeste, abrange uma área de 636,14 ha florestados com *P. taeda*. O plantio foi realizado sem adubação, após queima, marcação e coroamento manual. A área de segunda rotação vem sendo utilizada com florestamento de pinus há 30 anos, aproximadamente.

Os dois povoamentos foram implantados em 1996 em espaçamento 3x2 m, com população de 1.666 mudas por hectare. Desse modo, na época anterior ao plantio do pinus, as duas áreas de estudo encontravam-se sob campo nativo. Além disso, ambos os povoamentos possuíam a mesma idade (13 anos), porém em ciclos de rotações distintos, favorecendo a avaliação da qualidade física do solo após a introdução da espécie *P. taeda*.

A coleta das amostras em cada área de estudo foi realizada por meio da abertura de trincheiras nas entrelinhas dos plantios da RT1 e RT2 e nas respectivas testemunhas: CN1 e CN2 (áreas adjacentes de campo nativo). Desse modo, foram abertas cinco trincheiras em cada área de estudo, totalizando 20 pontos de coleta.

Amostras com estrutura alterada e preservada foram coletadas em trincheiras com 0,60 m de profundidade, nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,20; 0,20-0,40; e 0,40-0,60 m. As amostras com estrutura alterada continham solo de toda espessura da camada. Já nas amostras com estrutura preservada foram coletadas duplicatas no centro das camadas, em cada uma das trincheiras, utilizando-se, para isso, um cilindro extrator com 3,0 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro, introduzido verticalmente no solo.

2.2 Análises físicas do solo

As análises realizadas foram: granulometria, permeabilidade do solo ao ar, condutividade hidráulica do solo saturado, densidade e porosidade total, além de macro e microporosidade do solo.

A análise granulométrica foi obtida pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). Os dados da análise granulométrica (Tabela 1) indicam que as duas áreas

de estudo apresentaram granulometria bastante similar, ambas com textura argilosa nas camadas avaliadas.

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) foi avaliada em amostras com estrutura preservada e foram previamente saturadas em água por 72 h e equilibradas nas tensões de 1, 6 e 10 kPa, em coluna de areia, conforme descrito em Reinert e Reichert (2006), utilizando um permeâmetro de carga constante, segundo a metodologia e equipamento adaptados de Vossbrink (2004).

Após a determinação da K_a , as amostras foram novamente saturadas para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{es}) em permeâmetro de carga constante, conforme descrito em Embrapa (1997).

Ato contínuo, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até massa constante, bem como foi determinada a densidade do solo (D_s) pelo método do cilindro (EMBRAPA, 1997). A densidade de partículas do solo (D_p) foi obtida pelo método do balão volumétrico modificado, de acordo com a metodologia proposta por Gubiani et al. (2006). Na determinação da microporosidade, utilizou-se a coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), com a aplicação de 0,60 m de coluna de água para drenar os macroporos. A macroporosidade (M_a) foi calculada pela diferença entre a porosidade total (P_t) e a microporosidade (M_i). O grau de compactação (G_c) foi calculado conforme a equação 1.

$$G_c = \frac{D_s}{D_{s_{IHO}}} \times 100 \quad (1)$$

em que:

G_c : grau de compactação (%);

D_s : densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

$D_{s_{IHO}}$: densidade crítica estabelecida a partir do intervalo hídrico ótimo ($D_{s_{IHO}} = -0,00078 \times \% \text{ argila} + 1,83803$, conforme Reichert et al., 2009).

2.3 Análises estatísticas dos dados

Nas análises estatísticas, os dados referentes à RT1 e RT2 foram comparados com as respectivas testemunhas, CN1 e CN2. Para isso, os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk, a fim de verificar a normalidade na sua distribuição. Na ausência de normalidade, os dados foram transformados utilizando a transformação Box-Cox. Posteriormente, os dados

Tabela 1 – Frações granulométricas do Cambissolo Húmico e as respectivas classes texturais das áreas e camadas em estudo.
Table 1 – granulometric fractions of Haplumbrept and their textural classes and layers for the areas under study.

Camada(m)	Areia (%)			Silte (%)	Argila(%)	ClasseTextural
	Total	Grossa	Fina RT1			
0,00 - 0,05	15,56	10,19	5,37	27,53	56,91	Argilosa
0,05 - 0,20	16,45	10,58	5,88	29,73	53,82	Argilosa
0,20 - 0,40	17,92	12,56	5,37	29,91	52,17	Argilosa
0,40 - 0,60	19,74	13,85	5,90	23,86	56,40	Argilosa
CN1						
0,00 - 0,05	17,94	11,56	6,38	32,21	49,85	Argilosa
0,05 - 0,20	16,17	10,78	5,39	34,24	49,58	Argilosa
0,20 - 0,40	15,64	10,46	5,18	25,48	58,89	Argilosa
0,40 - 0,60	14,28	9,48	4,80	20,84	64,87	Muito argilosa
RT2						
0,00 - 0,05	20,80	12,34	8,46	30,17	49,02	Argilosa
0,05 - 0,20	21,58	13,54	8,03	29,67	48,75	Argilosa
0,20 - 0,40	19,54	12,66	6,88	23,96	56,50	Argilosa
0,40 - 0,60	17,91	11,57	6,34	23,26	58,92	Argilosa
CN2						
0,00 - 0,05	17,50	10,38	7,12	30,80	51,70	Argilosa
0,05 - 0,20	17,00	10,64	6,36	32,94	50,05	Argilosa
0,20 - 0,40	19,24	12,44	6,80	26,29	54,47	Argilosa
0,40 - 0,60	15,54	8,60	6,94	26,84	57,62	Argilosa

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo nativo adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; e CN2 = campo nativo adjacente à RT2.

foram submetidos à comparação de médias pelo teste “t”, de Student, a 5% de probabilidade de erro. Para os dados que ainda mantiveram a tendência de não normalidade (condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade do solo ao ar referente à tensão de 1 kPa), foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro.

3. RESULTADOS

Na Tabela 2, encontram-se os valores de densidade, grau de compactação de espaço poroso e condutividade hidráulica saturada do solo.

3.1 Densidade, grau de compactação e porosidade do solo

Verificou-se que os valores de densidade do solo (Ds) não diferiram significativamente entre si nas diferentes camadas e áreas avaliadas (RT1 vs. CN1 e RT2 vs. CN2). Os valores mínimos foram encontrados na camada de 0,00-0,05 m (0,89 e 0,84 Mg m⁻³), com grau de compactação (Gc) inferior a 50%, e os valores máximos na camada de 0,40-0,60 m (1,21 e 1,08 Mg m⁻³) com Gc inferior a 70%, respectivamente, nos tratamentos

RT1 e RT2 (Tabela 2). Esses valores de Ds são inferiores aos considerados críticos (1,30 a 1,40 g cm⁻³) para o crescimento das plantas, como proposto por Reichert et al. (2007).

Pode-se constatar, também, que não houve diferenças significativas entre RT1 vs. CN1 e RT2 vs. CN2 para os valores de porosidade total (Pt). Em todas as áreas e camadas avaliadas, os valores de Pt foram superiores a 0,5 m³ m⁻³, evidenciando boas condições estruturais para o crescimento vegetativo. Esses valores de Pt situam-se dentro do intervalo encontrado por Morales et al. (2010), que, ao analisarem diferentes sítios com povoamentos de pinus, observaram valores médios de Pt oscilando entre 0,42 e 0,60 m³ m⁻³.

A macroporosidade (Ma) no tratamento RT1, até a profundidade de 0,0-0,20 m, foi superior em 145% (valor médio das camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,20 m) em relação ao que foi quantificado em amostras coletadas em campo nativo; nas demais camadas, não houve diferenças significativas. No tratamento RT2, a Ma foi superior a 157% em relação à encontrada em amostras coletadas em campo nativo; apenas na camada de 0,0-0,05 m, não diferindo nas demais camadas.

Tabela 2 – Densidade do solo (Ds), grau de compactação (Gc), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_{es}) em diferentes camadas do Cambissolo Húmico em estudo, submetido a diferentes tratamentos.

Table 2 – Soil density (Ds), degree of compaction (Gc) total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi) and saturated hydraulic conductivity (K_{es}) in different layers of Haplumbrept study, subjected to different treatment.

Tratamento	Ds	Gc	Pt	Ma	Mi	K_{es}
	Mg m ⁻³	%		m ³ m ⁻³		mm h ⁻¹
Camada 0,00-0,05 m						
RT1	0,89 a*	49,72	0,64 a	0,17 a	0,47 b	272,00 a**
CN1	0,88 a	48,88	0,63 a	0,05 b	0,58 a	84,03 b
c.v. (%)	4,10	-	2,45	29,63	4,39	-
RT2	0,84 a	46,67	0,65 a	0,18 a	0,47 b	281,84 a
CN2	0,96 a	53,33	0,61 a	0,07 b	0,54 a	38,03 b
c.v. (%)	12,81	-	7,13	37,79	4,65	-
Camada 0,05-0,20 m						
RT1	1,00 a	55,55	0,59 a	0,09 a	0,50 b	169,97 a
CN1	1,00 a	55,55	0,60 a	0,06 b	0,54 a	22,73 b
c.v. (%)	5,35	-	3,05	33,88	4,74	-
RT2	1,04 a	57,78	0,58 a	0,09 a	0,49 a	59,77 a
CN2	1,00 a	55,55	0,60 a	0,10 a	0,50 a	25,55 a
c.v. (%)	6,37	-	4,32	42,58	4,73	-
Camada 0,20-0,40 m						
RT1	1,08 a	60,00	0,58 a	0,12 a	0,46 b	61,69 a
CN1	1,07 a	59,78	0,58 a	0,09 a	0,49 a	1,08 b
c.v. (%)	5,64	-	4,38	35,61	3,50	-
RT2	1,01 a	56,42	0,60 a	0,11 a	0,49 a	45,29 a
CN2	1,08 a	60,33	0,58 a	0,12 a	0,46 a	15,34 a
c.v. (%)	7,13	-	3,91	31,10	5,37	-
Camada 0,40- 0,60 m						
RT1	1,21 a	67,60	0,53 a	0,06 a	0,47 b	2,37 a
CN1	1,15 a	64,24	0,55 a	0,05 a	0,50 a	0,07 b
c.v. (%)	3,30	-	3,17	42,87	3,28	-
RT2	1,08 a	60,33	0,58 a	0,10 a	0,48 a	7,61 a
CN2	1,14 a	63,69	0,56 a	0,07 a	0,49 a	2,54 a
c.v. (%)	6,10	-	4,59	41,87	3,86	-

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo nativo adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo nativo adjacente à RT2; e c.v. = coeficiente de variação. *Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si, pelo teste de t de student a 5% de probabilidade de erro. **Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro.

A microporosidade (Mi) nas amostras de solo foi estatisticamente diferente em todas as camadas avaliadas no tratamento RT1, enquanto no tratamento RT2 ocorreu diferença significativa apenas na camada de 0,0-0,05 m, sendo os maiores valores encontrados na área de campo nativo (Tabela 2). Nas demais camadas do tratamento RT1, os valores não diferiram estatisticamente, demonstrando que amostras de solo coletadas em áreas submetidas ao tratamento RT2 apresentaram valores de Mi similares aos quantificados em amostras submetidas às condições naturais do solo.

Considerando apenas as camadas superficiais, Bertol et al. (2004) também verificaram pequena variação nos valores de Mi em relação à variação observada nos valores de Ma, quantificados em amostras de Cambissolo Húmico Alumínico léptico manejado e cultivado de diferentes formas.

3.2 Condutividade hidráulica do solo saturado

A RT1 apresentou valores de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{es}) superiores em relação ao CN1, em todas as camadas avaliadas (Tabela 2). Os valores de K_{es} mantiveram-se elevados, principalmente,

nas camadas mais superficiais amostradas (0,0-0,05 m e 0,05-0,20 m), correspondendo aos valores de 272,00 (224% superior ao CN1) e 169,97 mm h⁻¹ (648% superior ao CN1), respectivamente, sendo em média 436% superior ao CN1, nessas camadas. Amostras de solo submetidas ao tratamento RT2 apresentaram, apenas na camada de 0,0-0,05 m, valores de K_{es} estatisticamente superiores aos obtidos em amostras submetidas ao tratamento CN2, com valor médio superior a 640%. Entretanto, observou-se que esse valor diminuiu abruptamente na camada seguinte, de forma similar à macroporosidade do solo. Notou-se ainda que ambas as áreas de estudo apresentavam o mesmo comportamento, ou seja, houve redução da K_{es} à medida que aumentou a profundidade do perfil. Comportamento semelhante foi observado por Silva et al. (2008).

3.3 Permeabilidade do solo ao ar

Na Tabela 3, encontram-se os valores de permeabilidade do solo ao ar (K_a), nas tensões 1, 6 e 10 kPa. Em amostras de solo submetidas ao tratamento RT1, observou-se diferença significativa nos valores de K_a , nas tensões de 6 e 10 kPa, até a profundidade de 0,20 m, o que pode estar associado à elevada macroporosidade e à baixa microporosidade nessas camadas (Tabela 2). Nesse caso, amostras submetidas ao tratamento RT1 apresentaram maior K_a , 172% em média (média nas tensões de 6 e 10 kPa), em relação às obtidas em amostras coletadas em campo nativo. No entanto, amostras de solo submetidas ao RT2 apresentaram diferença significativa apenas na tensão de 6 kPa, na camada de 0,05 a 0,20 m. Todavia, verificou-se que amostras de solo submetidas ao RT2 apresentaram maior K_a que aquelas coletadas em campo nativo até a profundidade de 0,20 m, em média de 111% (média nas tensões de 6 e 10 kPa). Esse resultado pode estar associado à elevada M_a e à baixa M_i , presentes na camada de 0,0-0,05 m (Tabela 2).

4. DISCUSSÃO

Os menores valores de D_s da camada superficial podem estar associados ao fato de o solo sofrer pouca intervenção devido aos longos ciclos de rotação e presença de serapilheira, que possibilita a permanência de maior volume de material orgânico, promovendo a recuperação da estrutura nessa camada. O mesmo efeito foi verificado por Araújo et al. (2007) e Bognola et al. (2010).

Ocorreu aumento da D_s com a profundidade, demonstrando que a D_s tende a apresentar esse comportamento devido à redução no teor da matéria orgânica, menor atividade biológica (raízes e organismos do solo) e adensamento natural (MORALES et al., 2010). Igualmente, os povoamentos de pinus não promoveram alterações significativas na D_s , quando comparados com os valores encontrados no campo nativo, o que sugere, assim, que o cultivo de pinus não alterou a estrutura do solo, preservando sua qualidade física. Da mesma forma, neste trabalho, se for analisado que o G_c foi inferior a 70%, conclui-se que a maior D_s observada poderia ser acrescida em mais de 30% para se aproximar da densidade crítica estabelecida a partir do intervalo hídrico ótimo ($D_{s_{HO}}$), proposta por Reichert et al. (2009).

Quanto à M_a , o resultado está relacionado ao manejo praticado na área, tal como a queima e o corte raso, os quais podem ser responsáveis pela perda de matéria orgânica do solo. Logo, a substância orgânica, quando queimada, não sofre transformação e incorporação biológica, desfavorecendo o efeito benéfico secundário da matéria orgânica sobre a estrutura do solo (ANDRAE, 1978). Outrossim, na prática do corte raso, o solo permanece temporariamente sem a proteção do dossel e os efeitos promovidos pela ciclagem da cobertura florestal. Dessa forma, o tratamento RT2 proporcionou o armazenamento de matéria orgânica apenas na camada mais superficial, pois o efeito da cobertura florestal, após perturbações dessa natureza, principalmente devido ao uso do fogo no preparo da área, necessitaria de um período maior para promover a incorporação de matéria orgânica ao longo do perfil. Observa-se, também, que alguns valores referentes à M_a , principalmente na área de campo nativo, estiveram abaixo das condições ideais para a oxigenação do solo (0,10 cm³ cm⁻³), de acordo com Reichert et al. (2007).

A maior M_a encontrada nas camadas superficiais de solo submetido aos tratamentos RT1 e RT2 pode estar relacionada à ocorrência de sistemas radiculares lignificados e possíveis bioporos resultantes da decomposição e renovação dessas raízes na superfície do solo, além da atividade biológica da mesofauna. Nesse caso, a presença de maior M_a proporciona adequada circulação de oxigênio para o desenvolvimento das raízes e diminuição da sua resistência à penetração, além da manutenção de elevadas taxas de infiltração

Tabela 3 – Permeabilidade do solo ao ar (K_a) nas tensões de 1, 6 e 10 kPa, em diferentes camadas do Cambissolo Húmico em estudo, submetido a diferentes tratamentos.**Table 3** – Permeability of the soil air (K_a) tensions 1, 6 and 10 kPa in different layers of Haplumbrept study, subjected to different treatments.

Tratamento	K_a 1kPa	K_a 6kPa	K_a 10kPa
	μm^2		
Camada 0,00-0,05 m			
RT1	23,81 a**	47,24 a*	60,00 a*
CN1	7,88 a	27,52 b	35,34 b
c.v. (%)	-	29,95	27,61
RT2	13,87 a	46,69 a	57,99 a
CN2	8,02 a	22,64 a	24,06 a
c.v. (%)	-	22,92	18,47
Camada 0,05-0,20 m			
RT1	11,90 a	35,12 a	55,19 a
CN1	5,24 a	7,86 b	18,21 b
c.v. (%)	-	34,33	61,52
RT2	6,29 a	33,43 a	46,67 a
CN2	2,59 a	16,68 b	23,47 a
c.v. (%)	-	14,02	18,02
Camada 0,20-0,40 m			
RT1	3,93 a	32,49 a	48,11 a
CN1	4,06 a	18,85 a	28,95 a
c.v. (%)	-	58,59	72,79
RT2	4,26 a	20,60 a	26,43 a
CN2	2,18 a	24,48 a	34,85 a
c.v. (%)	-	25,39	28,32
Camada 0,40- 0,60 m			
RT1	3,84 a	26,49 a	44,57 a
CN1	1,89 a	14,06 a	21,52 a
c.v. (%)	-	74,34	77,23
RT2	4,45 a	13,75 a	17,34 a
CN2	1,33 a	10,69 a	21,92 a
c.v. (%)	-	27,71	25,79

RT1 = área de estudo de 1ª rotação; CN1 = campo nativo adjacente à RT1; RT2 = área de estudo de 2ª rotação; CN2 = campo nativo adjacente à RT2; e c.v. = coeficiente de variação. *Médias não seguidas por mesma letra na coluna diferem entre si, pelo teste t a 5% de probabilidade de erro. ** Médias de tratamentos seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade de erro.

de água no solo, reduzindo o escoamento superficial e possíveis problemas de erosão hídrica. Essas camadas não só absorvem várias vezes o seu próprio peso de água, mas também reduzem o impacto das gotas de chuva, impedindo a formação de crostas superficiais (PRITCHETT; FISHER, 1987), de modo a garantir maior conservação do solo e preservação do meio ambiente.

Em suma, a substituição do campo nativo por povoamento de pinus não alterou a porosidade total do Cambissolo Húmico. No entanto, proporcionou aumentos na Ma, fundamentalmente nas camadas mais superficiais, favorecendo a estruturação dessas camadas. Isso mostra a recuperação das condições físicas e a

manutenção da capacidade produtiva do solo, preceitos que se busca no manejo do solo. Nesse caso, possivelmente as amostras de solo submetidas ao tratamento RT2 teriam apresentado o mesmo comportamento, no que se refere à Ma, caso não tivesse sido submetida ao manejo com fogo, aplicado anteriormente na área. A Mi esteve associada inversamente à Ma, sendo geralmente maior na área de campo nativo.

Os elevados valores da K_{ss} encontrados nas camadas superficiais do solo, nos tratamentos RT1 e RT2, podem estar relacionados à maior proporção de macroporos até a camada de 0,20 m (Tabela 2). Os

valores medidos proporcionam classificação da permeabilidade do solo como rápida e moderada a rápida, respectivamente (SOIL SURVEY STAFF, 1993).

Deve-se considerar, ainda, que a presença de “megaporos” é mais comum nas camadas superficiais, e seus efeitos podem não influenciar tão acentuadamente os resultados de macroporosidade. Contudo, afetarão bastante os valores de condutividade hidráulica saturada, tendo em vista que a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (lei de Poiseuille) e, por essas razões, é comum obter valores altos de K_{es} nessa camada (REICHERT et al., 2007).

Em razão disso, os altos valores de K_{es} encontrados nas camadas superficiais refletem o efeito benéfico da cobertura florestal nesse atributo. Além disso, os longos períodos de rotação, sem interferência do manejo na área, são capazes de recuperar e manter o espaço poroso que havia sido modificado nas operações de implantação e, dessa maneira, proporcionar aumentos da K_{es} .

O fato de a condutividade hidráulica se diferenciar apenas na camada de 0,0 a 0,05 m, nas amostras submetidas ao tratamento RT2, pode também estar relacionado à elevada presença de macroporos nessa camada (Tabela 2).

A redução da K_{es} com o aumento em profundidade foi observada nas duas áreas de estudo avaliadas (Tabela 2), resultado que se deve, possivelmente, à redução no conteúdo de matéria orgânica, Pt e Ma, bem como ao aumento proporcional da Ds em profundidade. Nesse caso, considera-se que essas alterações contribuem para que ocorram decréscimos do diâmetro dos poros, reduzindo, assim, o fluxo de água ao longo do perfil (REICHERT et al., 2007).

Alguns estudos têm definido a K_a como dependente da estrutura do solo (IVERSEN et al., 2001; TULI et al., 2005; SILVA et al., 2009), influenciada pela Pt, distribuição e geometria do sistema poroso, tortuosidade, conectividade e restrição (MOLDRUP et al., 2003; DORNER; HORN, 2009). Mais precisamente, a K_a é condicionada em relação ao tamanho e continuidade dos Ma, considerados até mesmo mais importantes do que a quantidade de poros na determinação do fluxo de ar (BALL et al., 1988) e, portanto, sendo comum apresentar-se elevada nas camadas mais superficiais.

Diante disso, é possível concluir que o tratamento RT1 proporcionou condições para se obterem poros com diâmetros maiores e contínuos no solo, devido aos longos períodos sem interferência do manejo na área e deposição de material orgânico, o qual favorece a sua agregação, formando, assim, maior quantidade de poros interagregados disponíveis para trocas gasosas (LAURÉN et al., 2000). É provável ainda que, nessas camadas, ocorram caminhos preferenciais, devido à presença de raízes lignificadas e à atividade da fauna edáfica (SILVA et al., 2009).

Avaliando a K_a em um sítio com *P. sylvestris*, Laurén (1997) encontrou maiores valores na camada húmica da floresta de pinus, em comparação com solos minerais e turfas. Nesse caso, a alta K_a foi justificada pela grande quantidade e continuidade dos macroporos, formados pelo material fracamente decomposto nessa camada. A elevada K_a e a continuidade dos poros permitiram eficaz troca de gases, bem como a infiltração de água na camada húmica. Estudando a K_a sob floresta nativa e de coníferas (áreas com e sem queima), Chief et al. (2008) encontraram maiores valores nas áreas de floresta nativa que não sofreram queimadas. Esse resultado foi atribuído à desagregação do solo e à redução dos Ma, em função da combustão da matéria orgânica. Como resultado da queima, houve também, na floresta de coníferas, aumentos significativos na Ds e diminuição vertiginosa da porosidade.

A K_a aumentou com a tensão aplicada, tendo em vista que a K_a é inversamente relacionada ao teor de água do solo. Portanto, o valor da permeabilidade ao ar aumentou devido à redução no teor de água da amostra de solo, fato que pode estar associado à maior proporção de poros vazios e à formação de caminhos preferenciais para o escoamento do ar à medida que os poros de tamanho menores foram sendo progressivamente drenados (SILVA et al., 2009). Enfim, o máximo valor de permeabilidade ao ar é alcançado quando o solo está seco, diminuindo com seu umedecimento até valores próximos de zero, quando ocorre a saturação (BALL; SCHJØNNING, 2002).

De modo geral, em cada tensão aplicada houve tendência de redução da K_a com o aumento da profundidade do solo. Esse fato pode estar relacionado ao aumento na Ds e redução na Pt, embora não tenham se diferenciado significativamente, como visto anteriormente. Esse resultado corrobora os de Silva et al. (2009), os quais consideram que a K_a depende

basicamente do conteúdo de água e da densidade do solo, pois ambos influenciam a geometria e a continuidade do sistema poroso. Além disso, esse comportamento vem acompanhado da redução do carbono orgânico total, não favorecendo a estruturação e agregação do solo e, assim, influenciando a redução da aeração (TULI et al., 2005).

5. CONCLUSÃO

A substituição do campo nativo por povoamento de pinus proporcionou aumento da macroporosidade, que refletiu positivamente na condutividade hidráulica e na permeabilidade do solo ao ar, o que levou à apresentação de maior qualidade estrutural superficial no Cambissolo Húmico estudado.

6. REFERÊNCIAS

ANDRAE, F. **Ecologia florestal**. Santa Maria: UFSM, 1978.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.5, p.1099-1108, 2007.

BALL, B.C.; O'SULLIVAN, M.F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, v.39, n.3, p.327-339, 1988.

BALL, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 5.ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002. Pt 4. p.1141-1158.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.28, n.1, p.155-163, 2004.

BOGNOLA, I.A.; DEDECEK, R.A.; LAVORANTI, A.J.; HIGA, A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, n.1, p.37-49, 2010.

CHIEF, K.; FERRÉ, T.P.A.; NIJSSEN, B. Correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity: unburned and burned soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, n.1, p.1501-1509, 2008.

DEDECEK, R.A. Meio físico para o crescimento de *Pinus*: limitações e manejo. In: SHIMIZU, J.Y. **Pínus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p.75-109.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Ed). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 1994. p. 03-21.

DORNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, v.102, n.2, p.225-232, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA DO SOLO - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

GONÇALVES, J.L.M. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p.1-46.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v.36, n.2, p.664-668, 2006.

IVERSEN, B.V.; SCHJØNNING, P.; POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, v.166, n.1, p.97-106, 2001.

- LAURÉN, A. Physical properties of the mor layer in a Scots pine stand. II. Air permeability. **Canadian Journal of Soil Science**, v.77, n.4, p.635-642, 1997.
- LAURÉN, A.; MANNERKOSKI, H.; ORJASNIEMI, T. Thermal and aeration properties of mor layers in Finland. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v.15, n.4, p.433-444, 2000.
- MARCHIORI, J.N.C. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: UFSM, 2005.
- MOLDRUP, P.; YOSHIKAWA, S.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; ROLSTON, D.E. Air permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, n.1, p.32-40, 2003.
- MORALES, C.A.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; DE ALMEIDA, J.A.; MARANGONI, J.M.; STAHL, J.; CHAVES, D.M. Qualidade do solo e produtividade de *Pinus taeda* no planalto catarinense. **Ciência Florestal**, v.20, n.4, p.629-640, 2010.
- NASCIMENTO, P.C. Roteiro e relatório da excursão técnica – pedologia. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- PRITCHETT, W.L.; FISHER, R.F. **Properties and management of forest soils**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- 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. **Tópicos em Ciência do Solo**. v.5, p.49-134, 2007.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v.102, n.2, p.242-254, 2009.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, v.36, n.6, p.1931-1935, 2006.
- SHIMIZU, J.Y.; SEBBENN, A.M. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. In: SHIMIZU, J. Y. **Pinus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p.49-73.
- SILVA, G.J.; VALADÃO JUNIOR, D.D.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E.C.; MAIA, J.C.S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-Amarelo do cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.2135-2143, 2008.
- SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, p.1535-1545, 2009.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington, D.C.: USDA, 1993. 437p. (Handbook, 18).
- TULI, A.; HOPMANS, J.W.; ROLSTON, D.E.; MOLDRUP, P. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.69, n.5, p.1361-1371, 2005.
- VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren**. Schriftenreihe: Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde; Kiel: Christian Albrechts Universität Kiel, 2004.