

## Evolução temporal do comportamento físico-hídrico do solo de um sistema agroflorestal no Vale do Ribeira – SP

Temporal evolution of soil hydro-physical behavior of an agroforestry system on Ribeira Valley – SP

Raul Shiso Toma<sup>1</sup>, Miguel Cooper<sup>2</sup>, Mayra Flores Tavares<sup>3</sup>,  
Camila Carolina de Carvalho<sup>4</sup> e Ariane Cristina Teato<sup>5</sup>

---

### Resumo

A crescente preocupação mundial com a sustentabilidade ambiental acarretou em uma demanda dos agricultores por práticas sustentáveis de produção, onde o emprego de práticas de manejo menos agressivas que preservem a estrutura do solo são fundamentais. Este estudo avaliou a evolução dos atributos físico-hídricos do solo em um sistema agroflorestal (SAF) localizado no município de Apiaí – SP. A avaliação da evolução ao longo do tempo dos atributos físico-hídricos do solo foi realizada através do monitoramento da densidade do solo, porosidade calculada, porosidade por análise de imagens, condutividade hidráulica e do conteúdo de matéria orgânica. Os resultados deste estudo mostram que o SAF estudado ao longo do tempo (abril de 2009 até janeiro de 2011) apresentou altos valores de matéria orgânica, principalmente na profundidade de 0,0 – 0,2 m. Estes altos valores de matéria orgânica proporcionam ao solo baixa densidade e altos valores de porosidade resultando em maior condutividade de água no solo. A análise de imagem identificou os poros complexos de tamanho grande, como os principais poros responsáveis pela elevada porosidade e condutividade hidráulica do solo estudado. O SAF apresentou evolução dos seus atributos físicos-hídricos do solo ao longo do tempo avaliado, isso foi possível pelo acúmulo de matéria orgânica, que contribui na melhoria dos atributos físicos do solo, favorecendo o funcionamento hídrico. Além disso, evidencia o potencial do SAF em melhorar ou manter os atributos físicos-hídricos do solo, tornando-se opção para a sua implantação na região, visto que apresentou resultados que indicam o baixo risco a formação de enxurrada e erosão, sendo uma alternativa de produção interessante para os produtores, pois promove a conservação do solo e da água.

**Palavras-chave:** Sistema agroflorestal, Atributo físico-hídrico, análise de imagens, condutividade hidráulica

### Abstract

World concern about environmental sustainability resulted in farmers' demand for sustainable production practices, where less aggressive management practices that preserve soil structure are fundamental. The present study evaluated soil hydro-physical attributes in an agroforestry system (SAF) located in Apiaí – SP. The evolution of soil hydro-physical attributes was evaluated through soil bulk density, calculated porosity, image analysis porosity, hydraulic conductivity and organic matter analysis. The results showed that agroforestry systems through time presented high values of organic matter, especially at the depth 0 – 0.2m. These high values of organic matter provide low soil bulk density and high porosity, resulting in higher water conductivity. Image analysis has identified big irregular pores as being the most important ones for the high porosity and hydraulic conductivity of soil. SAF presented an evolution of soil hydro-physical properties through time, which allowed for organic matter accumulation, which in turn contributed to the improvement of soil physical attributes that favor hydric functioning. Furthermore the potential of SAF for improving or maintaining soil hydro-physical attributes render it an adequate option for implementation in the region, due to results that bear a low risk of runoff formation and erosion; thus being an alternative of production for farmers, while promoting soil and water conservation.

**Keywords:** Agroforestry, image analysis, hydro-physical attributes; hydraulic conductivity

---

<sup>1</sup>Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. USP – Universidade de São Paulo - ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 09, Piracicaba – SP. E-mail: [raulst@ig.com.br](mailto:raulst@ig.com.br)

<sup>2</sup>Professor Associado. USP – Universidade de São Paulo - ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Ciência do Sol, Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 09, Piracicaba - SP. E-mail: [mcooper@usp.br](mailto:mcooper@usp.br)

<sup>3</sup>Engenheira Agrônoma. USP – Universidade de São Paulo - ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 09, Piracicaba – SP.

<sup>4</sup>Graduanda em eng. Agrônoma USP – Universidade de São Paulo - ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 09, Piracicaba – SP.

<sup>5</sup>Gestora Ambiental. USP – Universidade de São Paulo - ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 09, Piracicaba – SP.

## INTRODUÇÃO

A economia da região do Vale do Ribeira baseia-se no intenso cultivo de produtos agrícolas em modelo convencional, sendo o tomate um dos principais produtos cultivados, principalmente no Município de Apiaí, que é o principal produtor de tomate envarado (tomate de mesa) do Estado de São Paulo abastecendo 13% desse produto no mercado paulista (IEA, 2010).

No sistema convencional o solo é regularmente alterado, acelerando a decomposição da matéria orgânica e modificando a agregação, porosidade e densidade do solo, infiltração e retenção de água e a temperatura do solo, além de aumentar as perdas por erosão, e consequentemente a capacidade produtiva das áreas (LLANILLO et al., 2006; MOUSSA-MACHRAOUI, 2010; SHIPITALO et al., 2000).

A necessidade de reduzir o impacto ambiental das atividades humanas, principalmente das atividades agrícolas na degradação da estrutura do solo é o principal objetivo do manejo e conservação do solo. O preparo intensivo do solo prejudica suas propriedades físicas, diminuindo o rendimento das culturas e aumentando a deterioração do meio ambiente (PAGLIAI; VIGNOZZI, 2002). Somado a isto, ainda temos a perda da fertilidade e capacidade de suporte do solo (YOUNG et al., 1986), levando a condições impróprias para o desenvolvimento das atividades antrópicas, resultando no posterior abandono destas áreas.

Diante disso, um dos sistemas de manejo conservacionista estudados é o sistema agroflorestal, onde plantas agrícolas são combinadas com espécies arbóreas e arbustivas, na mesma unidade de manejo, ao mesmo tempo ou em sequência (INTERNATIONAL CENTER FOR RESEARCH IN AGROFORESTRY, 1995; ; NAIR, 1993; SILVA et al., 2011). Este sistema eleva a diversidade do agroecossistema e aproveita as interações benéficas que ocorrem entre as plantas de diferentes ciclos, portes e funções (SANCHEZ, 1995; YOUNG, 1997). Os sistemas agroflorestais proporcionam maior cobertura do solo, favorecem a preservação da fauna e da flora, promovem a ciclagem de nutrientes a partir da ação de sistemas radiculares diversos e propiciam um aporte contínuo de matéria orgânica (BREMAN; KESSLER, 1997; ARAÚJO et al., 2001; SANCHEZ, 2001; SCHROTH et al., 2002).

A proteção dos remanescentes florestais e dos recursos hídricos da região pode ser feita através

da preservação das propriedades físicas do solo pela adoção de sistemas de manejo alternativos que visem uma produção conservacionista. Sendo assim, acredita-se que o uso de sistemas de manejo alternativos que visem a proteção do solo contra a degradação é uma alternativa extremamente atraente para a região.

Nesse contexto o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o efeito de sistema agroflorestal na evolução dos atributos físico-hídricos do solo ao longo do tempo na região do Vale do Ribeira.

## MATERIAL E MÉTODOS

O sistema agroflorestal (SAF) selecionado para a avaliação ao longo do tempo, está localizado no assentamento tipo PDS (Projeto de Desenvolvimento Sustentável) “Luiz David de Macedo”, no entorno do Parque Estadual do Alto Ribeira (PETAR), localizado no município de Apiaí – SP. Para a avaliação da evolução dos seus atributos, foram coletadas amostras deformadas compostas para a análise da matéria orgânica (CANTARELLA et al., 2001) em três camadas: 0,0 – 0,2; 0,2 – 0,4 e 0,4 – 0,6 m ao longo do tempo e para a granulometria (GEE; BAUDER, 1986) nas camadas de 0,0 – 0,1; 0,0 – 0,2; 0,2 – 0,4; 0,4 – 0,6; 0,6 – 0,8; 0,8 – 1,0 e 1,0 – 1,2 m. Estas análises foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP. Amostras indeformadas foram coletadas para a densidade do solo (GROSSMAN; REINSCH, 2002) nas profundidades de 0,00 – 0,05 e 0,10 – 0,15 m, sendo coletadas 3 repetições por profundidade, estas mesmas amostras foram utilizadas para a determinação da densidade de partículas pelo método do picnômetro de gás hélio. Com estes resultados foi possível calcular a porosidade total do solo ( $\alpha$ ) para ambas as profundidades, a partir da seguinte equação:  $\alpha = 1 - (D_s/D_p)$ . Onde,  $D_s$  é a densidade do solo e  $D_p$  é a densidade das partículas.

Para a análise de imagens, foram esculpidas no solo amostras indeformadas com dimensão de 0,12 x 0,07 x 0,04 m nas profundidades de 0,00 – 0,12 m e 0,12 – 0,24 m no solo. Estas foram seca e impregnadas com solução formada por resina poliéster (MURPHY, 1986), monômero de estireno (CASTRO et al., 2003), catalisador (RINGROSE-VOASE, 1991) e pigmento fluorescente Tinopal OB (BASF®) (MURPHY et al., 1977). Depois de endurecidos, os blocos impregnados foram cortados e lixados. Um blo-

co por profundidade contendo 25 imagens, foi utilizado para a aquisição das imagens. A identificação dos poros na imagem foi feita através de rotinas de programação desenvolvidas no software Noesis® Visilog 5.4. A classificação e quantificação da porosidade total, foi realizado seguindo os critérios definidos por Cooper e Vidal-Torrado, (2005) e otimizado por macros desenvolvidas em linguagem Visual Basic no Microsoft® Excel (JUHÁSZ et al., 2007).

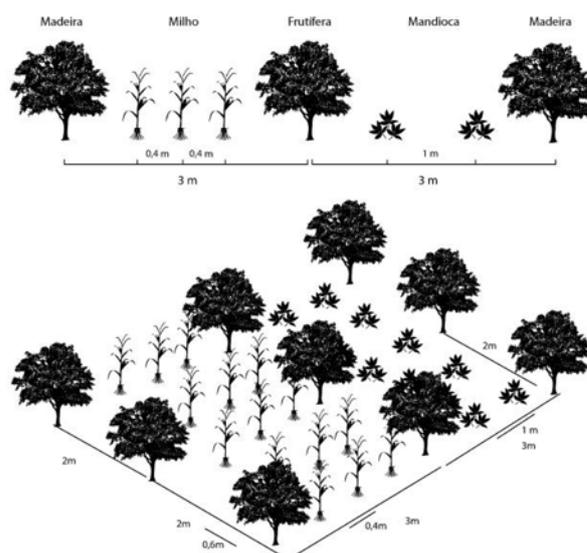
Para medir a infiltração de água no solo, foi utilizado o infiltrômetro de disco (PERROUX; WHITE, 1988). Três potenciais foram aplicados durante as medidas de infiltração: -2,0; -4,5 e -6,5 cm, sendo realizados 3 repetições para cada potencial. O protocolo de cálculo utilizado neste trabalho é apresentado por Ankeny et al., (1991) que se baseia na equação do Wooding, (1968). Este protocolo é simplificado utilizando as medidas obtidas com o infiltrômetro com um disco somente. Mas este protocolo simplificado só permite estimar a condutividade hidráulica  $K(\Psi)$ . Além destes potenciais medidos em campo, foi calculada a condutividade saturada dos solos para cada coleta, este cálculo baseou-se no método proposto por Gardner (1958) que é um artifício de transformação para linearizar a equação diferencial desenvolvida por Richards (1931) que descreve o movimento da água no meio poroso, homogêneo e não saturado com fluxo em regime permanente.

Foram analisados as diferenças estatísticas dos dados de densidade do solo e porosidade do solo obtidos pela micromorfologia para duas profundidades e de condutividade de água na superfície para cada potencial, considerando ainda o tempo como um dos fatores responsáveis pela variação. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk (1965). Realizou-se também a análise de variância pelo teste F, com comparação de médias pelo teste de Tukey, com 5% de probabilidade. Para a realização das análises, foi utilizado o programa computacional SAS (SAS INSTITUTE, 1995).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O histórico das áreas é essencial para a compreensão das interpretações dos resultados das análises. O manejo é um fator que possui grande influência nos atributos físico-químicos do solo e foi registrado no dia de cada coleta (Tabela 01).

Em abril de 2009 a área possuía como culturas perenes e semi-perenes o milho (*Zea mays*) e mandioca (*Manihot esculenta*), intercaladas entre as arbóreas. As fileiras de árvores se dividiam em frutíferas com 4 espécies diferentes, limão thaiti (*Citrus aurantifolia* variedade taiti), lichia (*Litchi chinensis* Sonn), caqui (*Diospyros kaki*, L.f.) e mexirica cravo (*Citrus reticulata*) e fileiras de árvores destinadas para a extração de madeira com apenas a bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) intercaladas com as culturas perenes e semi-perenes e sendo mantidas capinadas e limpas de mato. O espaçamento utilizado para as espécies arbóreas foi de 3 metros entre linha e 2 metros entre plantas. O espaçamento do milho foi de de 0,4 x 0,6 m e da mandioca de 1,0 x 2,0m (Figura 01).



**Figura 1.** Representação do SAF implantado na área de estudo.

**Figure 1.** Representation of SAF adopted in the study area.

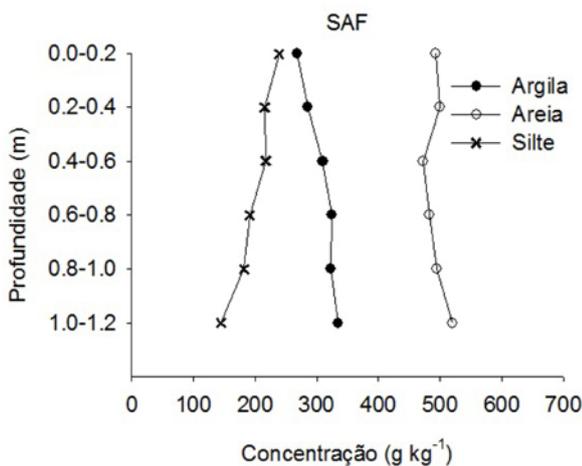
**Tabela 1.** Manejo adotado pelo SAF verificado no dia das coletas.

**Table 1.** Management adopted by SAF and checked on data collection day.

Coleta	Data	Manejo
1	Abr/09	Milho / Mandioca / Frutíferas / Bracatinga
2	Jul/09	Milho Roçado / Mandioca / Frutíferas / Bracatinga
3	Jul/10	Área limpa / Mandioca / Frutíferas / Bracatinga
4	Out/10	Capinado / Mandioca / Frutíferas / Bracatinga / Inhame
5	Jan/11	Capinado / Mandioca / Frutíferas / Bracatinga / Inhame

Na segunda coleta já havia sido realizada a colheita do milho e seus resíduos foram roçados para formar uma cobertura morta na superfície. Um ano após, foi realizada outra coleta de amostras de solo, nesse intervalo em conversa com o agricultor, foi realizado o plantio da cultura do milho novamente no início do ano de 2010, mas no dia da coleta a área estava limpa nas entre linhas das árvores e sem novos plantios. Em outubro de 2010 houve o acréscimo da cultura do inhame (*Colocasia esculenta*), que possui o mesmo espaçamento da mandioca, no local a área permanecia sem mato, sendo encontrada da mesma maneira na coleta seguinte.

A textura do solo da área do SAF é classificada pela Embrapa, (2006) como textura média, pois apresenta 260 g kg<sup>-1</sup> de argila na profundidade de 0,0 – 0,2 m aumentando gradativamente até atingir valor de 340 g kg<sup>-1</sup> de argila na profundidade de 1,0 – 1,2 m. Os valores de silte diminuem em profundidade (Figura 02). Os valores de areia variaram entre 470 e 520 g kg<sup>-1</sup>.



**Figura 2.** Gráfico dos valores de granulometria  
**Figure 2.** Graph of the particle-size values

As análises da matéria orgânica foram realizadas visando a caracterização do solo estudado durante a condução do projeto (abril de 2009 até janeiro de 2011) e a tentativa de verificar possíveis tendências de aumento ou diminuição conforme o tipo de manejo adotado pelo produtor.

Ao analisar a tabela do conteúdo de matéria orgânica no solo em cada coleta (Tabela 02), nota-se que principalmente na profundidade de 0,00 – 0,20 m os valores são considerados altos se compararmos com os solos de clima tropical. Este alto valor está relacionado com as condições climáticas (temperatura e precipitação média anual) que são fatores importantes na determinação dos níveis de matéria orgânica do solo (DALMOLIN et al., 2006; STEVENSON,

1994) presente neste local, onde a alta pluviosidade anual e as baixas temperaturas, reduzem a atividade biológica (TATE, 1992) e aumentam o conteúdo de matéria orgânica no solo.

Apesar das variações, observou-se uma tendência de aumento no conteúdo de matéria orgânica ao longo do tempo, principalmente na profundidade de 0,00 – 0,20 m, pois os SAFs se assemelham as condições naturais, consorciando várias espécies dentro da mesma área, favorecendo o aporte contínuo e diversificado de matéria orgânica (ARAÚJO et al., 2001; SÁNCHEZ, 2001; SCHROTH et al., 2002; YOUNG, 1997), além disso, essas mudanças na matéria orgânica do solo, são relativamente lentas e precisam de um longo período para detectar os efeitos na qualidade do solo (PRAUDEL et al., 2012).

**Tabela 2.** Valores de matéria orgânica de cada coleta realizada na área

Coleta	Profundidade	
	----- m -----	SAF
		M.O. (g kg <sup>-1</sup> )
1	0,0 – 0,2	67,1
	0,2 – 0,4	59,6
	0,4 – 0,6	49,2
2	0,0 – 0,2	138,9
	0,2 – 0,4	63,0
	0,4 – 0,6	40,6
3	0,0 – 0,2	121,6
	0,2 – 0,4	47,3
	0,4 – 0,6	35,4
4	0,0 – 0,2	59,5
	0,2 – 0,4	40,5
	0,4 – 0,6	25,7
5	0,0 – 0,2	229,8
	0,2 – 0,4	54,1
	0,4 – 0,6	35,1

Na tabela que se segue são apresentados os valores médios da densidade do solo e as análises estatísticas que mostram as diferenças entre as coletas ao longo do tempo.

O SAF possui solo com baixa densidade, inferiores a 0,95 Mg m<sup>-3</sup> (Tabela 03), semelhante a Carvalho et al. (2004), que encontrou densidade para os sistemas agroflorestais variando entre 0,84 e 0,97 Mg m<sup>-3</sup>.

Estes valores não apresentam diferença estatística entre as profundidades amostradas, como indicado pela análise de variância (Tabela 04). Nas coletas 2, 3 e 5 apresentaram densidade mais baixa com relação a coleta 1, obtendo diferença estatística entre elas na primeira profundidade amostrada. Na segunda profundidade houve apenas diferença entre a coleta 1 e

2, sendo a coleta 1 o maior valor de densidade encontrada no solo nesta profundidade. Esta baixa densidade é atribuída ao alto valor de matéria orgânica do solo que ajuda na agregação do mesmo (SZOTT, 1991), aumentando assim a porosidade e a infiltração de água e diminuindo a densidade no solo.

As densidades de partículas para cada coleta foram baixas (Tabela 05), em função da presença de matéria orgânica, a qual apresenta valores de densidade entre 1,30 a 1,50 Mg m<sup>-3</sup> (LIBARDI, 2005), fazendo com os valores de densidade de partículas sejam mais baixos com relação a um solo mineral com valor médio de 2,65 Mg m<sup>-3</sup> (LIBARDI, 2005; REICHARDT; TIM, 2004).

Vários autores citam a porosidade como um atributo físico indicador da qualidade do solo (HEID, 2011; SANTANA; BAHIA FILHO, 1998; SILVA et al., 2011), assim como, são utilizados também para verificar alterações no solo em função da mudança do manejo (D'ANDRÉA et al., 2002; MENEZES et al., 2008; SANTANA et al., 2006). A maior porosidade encontrada

na área SAF foi de 70,70% na profundidade de 0,10 – 0,15 m na coleta 2 e a menor na coleta 1 na profundidade de 0,00 – 0,05 m de 61,92% (Tabela 05). Na coleta 1 foram encontrados os menores valores de porosidade para esta área, nesta ocasião havia implantada a cultura do milho e nas outras coletas havia preferencialmente culturas semi-perenes e perenes na área, necessitando menor trato cultural na área e provavelmente reduzindo os impactos na área. Além disso, o SAF é um sistema de manejo que melhor conserva as condições do solo, que as mantém próximas às condições naturais, uma vez que consorcia várias espécies em uma mesma área, simulando a diversidade encontrada nas áreas naturais. Essas interações entre plantas de diferentes ciclos, portes e funções favorecem o aporte contínuo e diversificado de matéria orgânica, contribuindo com a melhoria das propriedades físicas do solo (ARAÚJO et al., 2001; BREMAN; KESSLER, 1997; MENDONÇA et al., 2001; SÁNCHEZ, 2001; SANCHEZ, 1995; SCHROTH et al., 2001; YOUNG, 1997).

**Tabela 3.** Médias das densidades  
**Table 3.** Bulk densities means

Profundidade ----- m -----	Coleta				
	1	2	3	4	5
	----- Mg m <sup>-3</sup> -----				
0,00 – 0,05	0,95 a	0,78 b	0,76 b	0,85 ab	0,77 b
0,10 – 0,15	0,95 a	0,71 b	0,86 ab	0,77 ab	0,76 ab

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto a coleta na mesma profundidade.  
Means followed by the same small letter on lines don't differ by collect on the same depth.

**Tabela 4.** Análise de variância de densidade  
**Table 4.** Analysis of variance of bulk densities

	GL	Soma de quadrados	Quadrados médios	Valor F	Pr(>F)
Tempo	4	157461	39365	12,1281	3,631e <sup>-05*</sup>
Profundidade	1	1005	1005	0,3095	0,58414
Tempo:Profundidade	4	29538	7384	2,2751	0,09705
Resíduo	20	64916	3246		
Total	29	252920	51000		

**Tabela 5.** Média dos valores de densidade de partículas e porosidade  
**Table 5.** Means of particle density values and porosity

Coleta	Profundidade	Densidade de Partículas	Porosidade
		Mg m <sup>-3</sup>	%
1	0,00 – 0,05	2,49	61,92
	0,10 – 0,15	2,55	61,96
2	0,00 – 0,05	2,43	68,09
	0,10 – 0,15	2,42	70,70
3	0,00 – 0,05	2,47	69,00
	0,10 – 0,15	2,44	64,76
4	0,00 – 0,05	2,46	65,39
	0,10 – 0,15	2,51	69,21
5	0,00 – 0,05	2,40	68,02
	0,10 – 0,15	2,42	68,81

Nota-se que a porosidade do solo nesta área foi alta, assumindo valores acima ou próximos do limite superior dos valores de referência para solos de classe textural franco de 52,8 – 47,2% (LIBARDI, 2005). Esse comportamento é compreendido pelas baixas densidades apresentada em todas as coletas, que são normalmente encontrados nestes tipo de sistema (CARVALHO et al., 2004) e pelos seus altos valores de matéria orgânica, que estão relacionadas com a melhoria dos atributos físicos do solo (PEZARICO et al., 2013; PINHO et al., 2012).

A medição da distribuição e o tamanho dos poros são importantes para avaliar as possíveis modificações na estrutura, justificando a sua caracterização (PAGLIAI, 1987). Entretanto, a estrutura do solo é difícil de ser definida ou quantificada (SOUTHORN, 2002), sendo a estimativa da distribuição dos tamanhos e dos tipos de poros um importante parâmetro.

A análise de imagens é usada cada vez mais para determinar o tamanho dos poros e sua distribuição (STOOPS, 2003), e neste trabalho a quantificação da porosidade foi realizada conforme a classificação de Bullock et. al (1985), que classifica os diâmetros entre 50 e 200 micrômetros como sendo os mesoporos e macroporos os diâmetros entre 500 a 5000 micrômetros.

A porosidade pela análise de imagens apresenta valores menores do que os valores de porosidade calculada, devido às dimensões estudadas em cada técnica. Na micromorfologia, o solo é estudado em imagens bidimensionais (MORAN et al., 1988), as quais podem ser relacionadas as três dimensões (RINGROSE-VOASE; BULLOCK, 1984) da porosidade calculada

ou até mesmo comparadas com as medidas volumétricas do conteúdo ou retenção de água no solo (BULLOCK; THOMASSON, 1979). Além disso, na análise de imagens só são contabilizados os macro e mesoporos.

A análise de variância mostra que para a porosidade existem diferenças significativas entre os tempos e para as profundidades analisadas (Tabela 06). As maiores porosidades na profundidade de 0,00 – 0,12 m foram encontradas nas coletas 1, 2 e 4, estas porosidades não obtiveram diferença estatística significativa entre si, apenas com relação as coletas 3 e 5 que foram as menores porosidades encontradas (Tabela 07). Na profundidade de 0,12 – 0,24 m houve uma grande variação entre as coletas ao longo do tempo, sendo de destaque a coleta 4 com a maior porosidade e a coleta 3 com a menor.

Todas as coletas com exceção da coleta 5, apresentaram diferença estatística entre as profundidade dentro de cada coleta, sendo que a maior porosidade foi encontrada na profundidade de 0,00 – 0,12 m.

No geral, para todas as coletas e todas as profundidades das áreas estudadas, verificou-se o predomínio dos poros do tipo complexo na classe de tamanho grande, sendo responsáveis em sua maioria pela maior porcentagem da porosidade do solo. A presença de altos valores de matéria orgânica encontrado neste trabalho, influencia na formação deste tipo de poro, visto que são definidos como estruturais (RINGROSE-VOASE, 1991). O restante da porosidade é representada pelos poros arredondados, alongados e complexos de tamanho pequeno assim como formado também por poros complexos de tama-

**Tabela 6.** Análise de variância de porosidade  
**Table 6.** Porosity analysis of variance

	GL	Soma de quadrados	Quadrados médios	Valor F	Pr(>F)
Tempo	4	7157,8	1789,4	22,1810	8,25e-16*
Profundidade	1	8697,5	8697,5	107,8100	< 2,2e-16*
Tempo:Profundidade	4	482,3	120,6	1,4947	0,2041
Resíduo	265	21378,8	80,7		
Total	274	37716,4	10688,2		

**Tabela 7.** Valores médios da porosidade pela análise de imagens  
**Table 7.** Means values of porosity on image analysis

Profundidade	Coleta				
	1	2	3	4	5
----- m -----	----- % -----				
0,00 – 0,12	37,7 A ab	41,1 A a	32,5 A bc	44,3 A a	27,0 A c
0,12 – 0,24	25,0 B bc	28,9 B ab	20,2 B d	31,8 B a	21,6 A cd

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, quanto a profundidade na mesma coleta.

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, quanto a coleta na mesma profundidade.

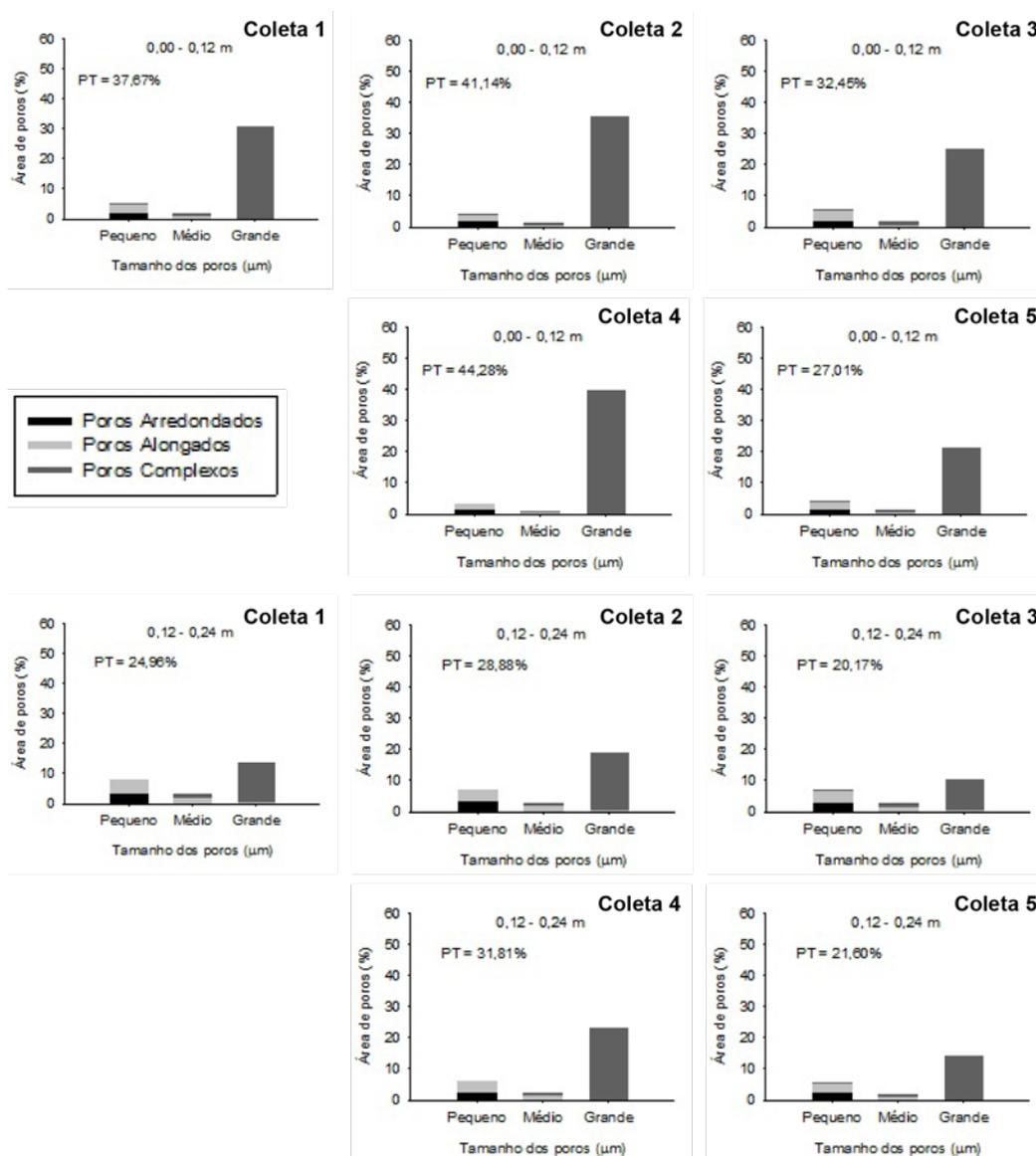
Means followed by same capital letters on columns don't differ within the same collection depth.

Means followed by the same small letter in lines don't differ within the same collection depth.

no médio podendo às vezes possuir neste tamanho poros alongados. Observou-se na coleta 1, 2, 5 e principalmente na 3, uma modificação na distribuição dos poros entre as profundidades de 0,00 – 0,12 m e 0,12 – 0,24 m (Figura 03), onde na primeira profundidade são observados um predomínio dos poros complexos grandes, que formam a maior porcentagem da porosidade total, menor porcentagem de poros alongados e arredondados pequenos e uma inexpressiva participação dos poros de tamanho médio, conferindo ao solos desta profundidade uma condutividade hidráulica alta, como veremos no próximo item. No entanto, a segunda profundidade há uma redução dos poros complexos grandes e um aumento nos poros alongados e arredondados pequenos, alterando o comportamento do solo entre a superfície e subsuperfície passando de

uma camada que apresenta boa condução para outra com maior capacidade de retenção de água, provavelmente beneficiando a cultura do milho na coleta 1 e as outras culturas presentes na área nas demais coletas. Este SAF caracterizado por esta distribuição de poros, apresenta uma boa infiltração de água no solo, reduzindo assim a formação de enxurrada e o risco de erosão principalmente na primeira camada, mas que possui um potencial para o armazenamento de água em sua segunda camada que favorece a disponibilidade de água para as plantas.

Na coleta 4 existe também uma redução da participação dos poros complexos grandes da primeira profundidade para a segunda, mas no entanto, esta redução não foi pronunciada como nas outras já mencionadas devido ao maior valor da porosidade nesta coleta.



**Figura 3.** Distribuição da porosidade total (PT), segundo o tamanho dos poros: pequeno ( $0,156 \times 10^{-3}$  –  $15,6 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>) médio ( $15,6 \times 10^{-3}$  –  $156 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>) e grande ( $>156 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>) e o tipo: arredondados, alongados e complexos  
**Figure 3.** Total porosity distribution (PT), according to pore size: small ( $0,156 \times 10^{-3}$  –  $15,6 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>); medium ( $15,6 \times 10^{-3}$  –  $156 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>); or large ( $>156 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>) and according to type: rounded, elongated or irregular

Segundo a classificação proposta por Reynolds e Elrick, (1986) os meios porosos que apresentam os valores de Kfs entre  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$   $m s^{-1}$  são de alta permeabilidade, o valor de Kfs de  $10^{-6}$   $m s^{-1}$  é classificado como um meio poroso de permeabilidade intermediária e o Kfs de  $10^{-7}$  e  $10^{-8}$   $m s^{-1}$  como sendo um meio poroso de baixa permeabilidade.

Para a área estudada, as condutividades hidráulicas saturadas foram classificadas como alta permeabilidade (Figura 04). Este comportamento é devido à alta porosidade encontrada em todas as épocas amostradas e também pelo alto valor de matéria orgânica no solo estudado, que promove redução dos valores de densidade do solo e consequentemente aumento da porosidade (DE-POLLI et al., 1996; MOSA-DDEGHI et al., 2009). A distribuição morfológica em tipos e tamanhos de poros encontrados pela análise de imagens, onde o predomínio foi dos poros complexos grandes conferem a estes solos uma maior condução de água em relação à retenção. Esse comportamento interfere na baixa formação de erosão, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo e garantindo a nutrição das plantas presentes no SAF e alta produção das espécies.

Para cada potencial os valores de condutividade não obtiveram diferença estatística entre elas ao longo das coletas, como visto na análise de variância (Tabela 08), entretanto, dentro de cada coleta, os potenciais -2, -4,5 e -6,5 cm apresentaram diferença significativa no valor do saturado para a coleta 3.

Na coleta 4 os potenciais de -2 e -4,5 cm não apresentaram diferença estatística entre os po-

tenciais de -6,5 cm e o saturado. Além disso, as curvas da condutividade hidráulica de cada coleta apresentaram pouca inclinação no gráfico, indicando uma alta condutividade hidráulica em todos os potenciais estudados (Tabela 09).

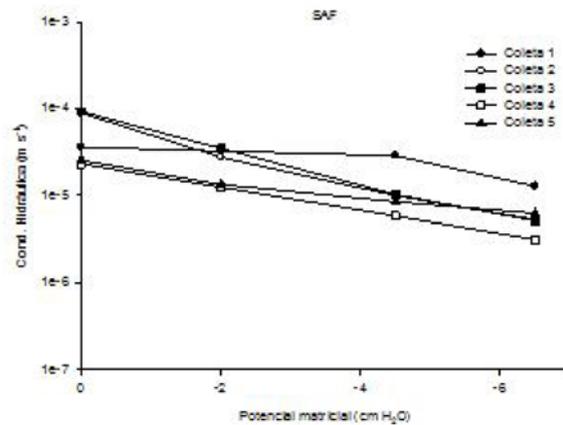


Figura 4. Gráficos da condutividade hidráulica  
Figure 4. Graphs on hydraulic conductivity

### CONCLUSÕES

O SAF apresentou evolução dos seus atributos físicos-hídricos do solo ao longo do tempo avaliado (abril de 2009 até janeiro de 2011), isso foi possível pelo acúmulo de matéria orgânica, característica geral dos SAFs, que contribui na melhoria dos atributos físicos do solo como a densidade e a porosidade, favorecendo o funcionamento hídrico.

Com este resultados obtidos, foi possível evidenciar o potencial do SAF em melhorar ou manter os atributos físicos-hídricos do solo, tornando-se opção para a sua implantação na

Tabela 8. Análise de variância de condutividade hidráulica  
Table 8. Analysis of Variance of hydraulic conductivity

	GL	Soma de quadrados	Quadrados médios	Valor F	Pr(>F)
Tempo	4	45,107	11,277	1,6862	0,1721866
Tensão	3	144,795	48,265	7,2171	0,0005548*
Tempo:Tensão	12	80,216	6,685	0,9996	0,4668625
Resíduo	40	267,505	6,688		
Total	59	537,623	72,915		

Tabela 9. Valores das médias da condutividade hidráulica  
Table 9. Values of hydraulic conductivity means

Potencial -- cm --	Coleta				
	1	2	3	4	5
	----- m s <sup>-1</sup> -----				
0,0	3,6x10 <sup>-05</sup> a	8,9x10 <sup>-05</sup> a	9,2x10 <sup>-05</sup> a	2,3x10 <sup>-05</sup> a	2,5x10 <sup>-05</sup> a
-2,0	3,2x10 <sup>-05</sup> a	2,7x10 <sup>-05</sup> a	3,5x10 <sup>-05</sup> b	1,2x10 <sup>-05</sup> ab	1,3x10 <sup>-05</sup> a
-4,5	2,9x10 <sup>-05</sup> a	9,9x10 <sup>-06</sup> a	1,0x10 <sup>-05</sup> b	5,8x10 <sup>-06</sup> ab	8,4x10 <sup>-06</sup> a
-6,5	1,3x10 <sup>-05</sup> a	5,3x10 <sup>-06</sup> a	5,1x10 <sup>-06</sup> b	3,1x10 <sup>-06</sup> b	6,2x10 <sup>-06</sup> a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si, quanto a tensão aplicada na mesma coleta.  
Means followed by the same small letter on columns do not differ among themselves as to the tension applied in the same collection.

região, visto que apresentou resultados que indicam o baixo risco a formação de enxurrada e erosão, sendo uma alternativa de produção interessante para os produtores, pois promove a conservação do solo e da água.

#### **AGRADECIMENTOS:**

Ao CNPq pela bolsa ao primeiro autor e financiamento do projeto, à FAPESP pelas bolsas de iniciação científica a terceira, quarta e quinta autoras e ao Vinícius Aguiar Suman de Moraes pela ilustração do sistema Agroflorestal.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ANKENY, M. D.; AHMED, M.; KASPAR, T. C.; HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 55, n. 2, p. 467-470, 1991.
- ARAÚJO, G. G. L.; ALBUQUERQUE, S. G.; GUIMARÃES FILHO, C. Opções no uso de forrageiras arbustivo-arbóreas na alimentação animal no semiárido do nordeste. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. (Eds.). *Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais*. Juiz de Fora: EMBRAPA Gado e Leite; Brasília: FAO, 2001. p. 111-137.
- BREMAN, H.; KESSLER, J. J. The potential benefits of agroforestry in the Sahel and other semi – arid regions. *European Journal of Agronomy*, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 25-33, 1997.
- BULLOCK, P.; THOMASSON, A. J. Rothamsted studies of soil structure. II. Measurement and characterization of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 30, n. 3, p. 391-413, 1979.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T.; BABEL, U. *Handbook for soil thin section description*. Wolverhampton: Waine Research Publication, 1985. 152 p.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B.; Andrade, J. C.; Cantarella, H.; Quaggio, J. A. (Eds.). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. p. 173-180.
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.11, p. 1153-1155, 2004.
- CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDAL-TORRADO, P. *Micromorfologia do solo: bases e aplicações*. Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa: SBCS, 2003. v. 3, p. 107-164.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.
- D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; CARNEIRO, M. A. C. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região do cerrado no Sul do Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 913-923, 2002.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P.; KLAMT, E.; KNICKER, H.; KNABNER, I. K. Organic matter characteristics and distribution in ferralsols profiles of a climosequence in Southern Brazil. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 57, n. 5, p. 644-654, 2006.
- DE-POLLI, H; GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; FRANCO, A. A. Adubação verde: Parâmetros para avaliação de sua eficiência. In: CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O, (Eds.). *Manejo Integrado de Solos em Microbacias Hidrográficas*. Londrina: IAPAR/SBCS, 1996. p. 225-242
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 412 p.
- GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, Oxford, v. 85, n. 4, p. 228–232, 1958.
- GEE, G.W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 383-411. (Agronomy Series, 9)

- GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; Topp G. C. (Eds.). **Methods of Soil Analysis**. Physical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v.4, p. 201-225.
- HEID, D.M. **Sustentabilidade de sistemas de uso da terra em Mato Grosso do Sul**. 2011. 107 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Mato Grosso do Sul, 2011.
- IEA - INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Disponível em: < [http://ciagri.iea.sp.gov.br/nial/subjetiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](http://ciagri.iea.sp.gov.br/nial/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1) >. Acesso em: 29 nov. 2011.
- INTERNATIONAL CENTER FOR RESEARCH IN AGROFORESTRY **Agroforestry at the service of farmers and the environment**. Nairobi: ICRAF, 1995.
- JUHÁSZ, C. E. P.; COOPER, M.; CURSI, P. R.; KETZER, A. O.; TOMA, R. S. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v. 64, n. 4, p. 344-354, 2007.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.
- LLANILLO, R. E.; RICHART, A.; TAVERES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 27, p. 205-220, 2006.
- MENDONÇA, E. S.; LEITE, L. F. C.; FERREIRA NETO, P. S. Cultivo de café em sistema agroflorestal: uma opção para recuperação de solos degradados. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 375-383, 2001.
- MENEZES, J. M. T.; VAN LEEUWEN, J.; VALERI, S. V.; CRUZ, M. C. P.; LEANDRO, R. C. Comparação entre solos sob uso agroflorestal e em florestas remanescentes adjacentes, no norte de Rondônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 893-898, 2008.
- MORAN, C. J.; KOPPI, A. J.; MURPHY, B. W.; McBRATNEY, A. B. Comparison of the macropore structure of a sandy loam surface soil horizon subjected to two tillage treatments. **Soil and Use Management**, Wallingford, v. 4, n. 3, p. 96-102, 1988.
- MOSADDEGHI, M. R.; MAHBOUBI, A. A.; SAFADOUST, A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 173-179, 2009.
- MOUSSA-MACHRAOUI, S. B.; ERROUISSI, F.; BEM-HAMMOUDA, M.; NOUIRA, S. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v. 106, n. 2, p. 247-253, 2010.
- MURPHY, C. P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A.B. Academic Publ., 1986. 149 p.
- MURPHY, C. P.; BULLOCK, P.; TURNER, R. H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 28, n. 3, p. 498-508, 1977.
- NAIR, P. K. R. **An introduction to agroforestry**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. 499 p.
- PAGLIAI, M. Micromorphometric and micromorphological investigation on the effect of compaction by pressures and deformations resulting from tillage and wheel traffic. In: MONNIER, G.; GOSS, M. J. (Eds.) **Compaction and regeneration**. Rotterdam: Academic Publ., 1987. p. 31-38.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. The pore system as an indicator of soil quality. In: PAGLIAI, M.; JONES, R.J.A. (Ed.). **Sustainable land management – environmental protection: a soil physical approach**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2002. p. 71-82. (Advances in Geoecology, 35).
- PERROUX, K. M.; WHITE, I. Designs for disk permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 5, p. 1205-1215, 1988.
- PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 56, n. 1, p. 40-47, 2013.
- PINHO, R. C.; MILLER, R. P.; ALFAIA, S. S. Agroforestry and the improvement of soil fertility: a view from Amazonia. **Applied and Environmental Soil Science**, New York v.2012, p.1-12, 2012.

- PRAUDEL, B. R.; UDAWATTA, R. P.; KREMER, R. J.; ANDERSON, S. H. Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and agroforestry buffer management. *Agroforest System*, Dordrecht, v. 84, n. 2, p. 311-323, 2012.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. *Ground Water Monitoring Review*, Westerville, v. 6, p. 84-95, 1986.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, College Park, v. 1, p. 318-333, 1931.
- RINGROSE-VOASE, A. J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v. 29, n. 6, p. 777-813, 1991.
- RINGROSE-VOASE, A.J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 35, n. 4, p. 673-684, 1984.
- SANCHEZ, P.A. Science in agroforestry. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v. 30, n. 1, p. 5-55, 1995.
- SÁNCHEZ, M. D. Panorama dos sistemas agroflorestais pecuários na América Latina. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. *Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais*. Juiz de Fora: Embrapa, 2001. p. 9-17.
- SANTANA, D. F.; BAHIA-FILHO, A. F. C. Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16., 1998, Montpellier. *Proceedings...* Montpellier: ISSS, 1998. 1 CD-ROM.
- SANTANA, M. B.; SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; FONTES, L. E. F. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de tabuleiros costeiros do estado da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 1-12, 2006.
- SAS - STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. *User's guide: release 8.0 2.ed.* Cary: SAS Institute, 1995. 1686 p.
- SCHROTH, G.; D'ANGELO, S. A.; TEIXEIRA, W. G.; HAAG, D.; LIEBEREI, R. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazônia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 163, n. 1-3, p. 131-150, 2002.
- SCHROTH, G.; LEHMANN, J.; RODRIGUES, M.R.L.; BARROS, E.; MACÊDO, J.L.V. Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v. 53, p. 85-102, 2001.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, Oxford, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965.
- SHIPITALO, M. J.; DICK, W. A.; EDWARDS, W. M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 53, n. 3-4, p. 167-183, 2000.
- SILVA, D. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; OLIVEIRAS, A. H.; SOUZA, F. S.; MARTINS, S. G.; MACEDO, R. L. G. Atributos do solo em sistemas agroflorestais, cultivo convencional e floresta nativa. *Revista de Estudos Ambientais*, Blumenau, v. 13, n. 1, p. 77-86, 2011.
- SOUTHORN, N. J. The soil structure component of soil quality under alternate grazing management strategies. In: PAGLIAI, M.; JONES, R. J. A. (Eds). *Sustainable and management – environmental protection: a soil physical approach*. Reiskirchen: Catena Verlag, 2002. p. 71-82. (Advances in GeoEcology, 35).
- STEVENSON, F. J. *Humus chemistry: genesis, composition, reaction*. New York: Wiley Interscience, 1994. 443 p.
- STOOPS, G. *Guidelines for analysis and description of soil regolith thin sections*. Madison: Soil Science Society of America, 2003. 184 p.
- SZOTT, L. T.; FERNANDES, E. C. M.; SANCHEZ, P. A. Soil-plant interactions in agroforestry systems. *Forest, Ecology and Management*, Amsterdam, v. 45, n. 1-4, p. 127-152, 1991.

TATE, K. R. Assessment, based on a climosequence of soils in tussock grasslands, of soil carbon storage and release in response to global warming. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 43, n. 4, p. 697-707, 1992.

WOODING, R. A. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water Resources Research**, Washington, v. 4, n. 6, p. 1259-1273, 1968.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil management**. 2ed. Nairobi: CAB International, 1997. 320 p.

YOUNG, R. A.; OLNESS, A. E.; MUTCHLER, C. K.; MOLDENHAUER, W. C. Chemical and physical enrichments of sediment from cropland. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 29, n. 1, p. 165-169, 1986.

Recebido em 07/05/2012  
Aceito para publicação em 17/04/2013