

Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil

Elói Panachuki¹, Teodorico Alves Sobrinho², Antônio Carlos Tadeu Vitorino¹, Daniel Fonseca de Carvalho^{3*} e Mário Artemio Urchei⁴

¹Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. ²Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (Ufms), Cx. Postal 533, 79804-970, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. ³Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil. ⁴Embrapa, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: carvalho@ufrj.br

RESUMO. O presente trabalho foi desenvolvido em Dourados, Estado do Mato Grosso do Sul, e teve como objetivo avaliar as características de infiltração de água no solo em três diferentes sistemas de cultivo: pastagem (Sistema A); aveia cultivada sob o sistema de plantio direto (Sistema B); e pastagem contínua (Sistema C). Os testes de campo para medir a infiltração de água foram realizados com uso de infiltrômetro de aspersão portátil para duas intensidades de precipitação (I_p): 60 mm h^{-1} e 100 mm h^{-1} . Com os dados de campo de volume de água infiltrado no tempo, ajustaram-se os modelos de Kostiakov-Lewis e de Horton. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que: a) o Sistema B apresentou a maior taxa de infiltração estável para a I_p de 60 mm h^{-1} e a menor taxa quando a I_p foi de 100 mm h^{-1} ; b) o modelo de Horton ajustou-se melhor aos dados, apresentando coeficiente de determinação sempre acima de 88,0%.

Palavras-chave: modelo de Kostiakov-Lewis, sistemas de cultivo, simulador de chuvas.

ABSTRACT. Evaluation of the infiltration rate in pasture-agriculture integration system, using a portable sprinkler infiltrometer. This study was carried out in Dourados, State of Mato Grosso do Sul, Brazil, in order to evaluate the soil water infiltration characteristics in three different tillage systems: pasture (System A), oat in minimum tillage (System B) and continuous pasture (System C). The field tests were performed by a sprinkler infiltrometer, regulated for rainfall intensities of 60 mm h^{-1} and 100 mm h^{-1} . Based on the field data, the Kostiakov-Lewis and Horton models were adjusted. It was concluded that: a) System B presented the largest stable infiltration rate for the intensity of 60 mm h^{-1} , and the lowest rate when the rainfall intensity was 100 mm h^{-1} ; b) The Horton model adjusted better to the field data, presenting determination coefficients always higher than 88.0%.

Key words: Kostiakov-Lewis model, tillage systems, rainfall simulator.

Introdução

O processo de infiltração é de importância prática, pois, muitas vezes, determina o balanço de água na zona das raízes e o deflúvio superficial, responsável pelo fenômeno da erosão durante precipitações pluviais. Desse modo, o conhecimento desse processo e das suas relações com as propriedades do solo é de fundamental importância para o eficiente manejo do solo e da água nos cultivos agrícolas (Reichardt, 1996). Segundo Pott e De Maria (2003), vários fatores condicionam o movimento de água no solo, os quais têm sido relatados por diversos autores a saber: a porosidade (Perroux e White, 1988; Everts e Kanwar, 1992), a densidade do solo (Sales *et al.*, 1999), a cobertura do solo (Roth *et al.*, 1985; Sidiras

e Roth, 1987), a textura e o grau de agregação do solo (Bertoni e Lombardi Neto, 1990), o selamento superficial (Reichert *et al.*, 1992; Chaves *et al.*, 1993), a umidade inicial (Araújo Filho e Ribeiro, 1996), a matéria orgânica, a estrutura e a variabilidade espacial do terreno (Klar, 1984).

Para uma adequada determinação das características de infiltração de água no solo, devem ser utilizados métodos que representem esse fenômeno de forma semelhante ao ocorrido naturalmente, uma vez que a taxa de infiltração é muito influenciada pelas condições de superfície e conteúdo de umidade do solo (Pruski *et al.*, 1997). Os métodos que não consideram o impacto da gota da chuva no solo, por exemplo, podem superestimar a

infiltração da água, originando problemas no dimensionamento de projetos conservacionistas, gerando problemas de erosão do solo. Em geral, quando se utiliza o infiltrômetro de aspersão para determinação da infiltração de água no solo, são menores os valores estimados para a taxa de infiltração estável em relação aos obtidos com outros métodos (Pott e De Maria, 2003).

De acordo com Chaves *et al.* (1993), o impacto das gotas de chuva contribuem para a redução da taxa de infiltração por duas maneiras: em primeiro lugar, pela diminuição da rugosidade superficial, reduzindo as chances de empoçamento, e, em segundo, pela formação de uma fina camada adensada na superfície, com uma condutividade menor do que a do solo subjacente. Essa camada recebe o nome de solo superficial e, depois de seca, torna-se uma crosta superficial, podendo reduzir a permeabilidade do solo em até 90%.

Por ser um fenômeno de superfície, a infiltração é influenciada pelo preparo do solo, o qual exerce um efeito temporário ao deixar o solo solto, aumentando a infiltração. Entretanto, se a superfície não estiver protegida com vegetação ou cobertura morta, a chuva e o vento, atuando na superfície do solo, reduzem a taxa de infiltração. A aração profunda é também um fator favorável ao aumento da infiltração, enquanto práticas que exercem compressão no solo podem diminuí-la. O cultivo em contorno, retardando a enxurrada, favorece a infiltração. O fator mais importante na taxa de infiltração é a cobertura vegetal que está no solo durante a chuva. As chuvas de elevada intensidade, ocorridas em situações em que o solo não está protegido pela cobertura vegetal ou pela cobertura morta, promovem compressão pelo impacto das gotas de chuva, e a infiltração torna-se reduzida; porém, em condições de adequada cobertura superficial, o efeito é amenizado (Bertoni e Lombardi Neto, 1990).

Segundo Bertol *et al.* (2001), práticas diferenciadas de manejo do solo e de cultivos provocam alterações nas propriedades físicas do solo que podem manifestar-se de várias maneiras, influenciando o desenvolvimento das plantas. Desse modo, o solo cultivado tende, com o tempo, a ter a estrutura original alterada, pelo fracionamento dos agregados em unidades menores, com conseqüente redução no volume de macroporos e aumentos no volume de microporos e na densidade do solo. Em decorrência disso, observa-se uma diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com conseqüente aumento das taxas de escoamento superficial.

Em geral, o preparo convencional altera mais acentuadamente as condições físicas do solo, pela desagregação superficial. Esse sistema favorece, quando da incidência de chuva, o aparecimento de crosta superficial e a compactação subsuperficial,

diminuindo a infiltração de água e facilitando o processo erosivo. Em decorrência dos problemas causados pelo preparo convencional, surgiram os preparos conservacionistas, que proporcionam menor mobilização do solo e mantêm maior proteção da superfície com os resíduos culturais. O plantio direto é um tipo de preparo conservacionista que procura minimizar a mobilização do solo. Apenas ao longo das linhas de semeadura é que ocorre revolvimento, apresentando entre elas uma superfície de baixa rugosidade, porém com alta cobertura residual, que protege o solo (Alves e Cabeda, 1999).

Silva e Kato (1998), promovendo simulações de chuva em solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa, quando desprovido de cobertura vegetal, obtiveram taxa de infiltração estável variando de 51,6 a 78 mm h⁻¹, proporcionando um valor médio de 61,3 mm h⁻¹. Na presença de cobertura morta, os valores variaram de 56 a 96 mm h⁻¹, e o valor médio ficou em 76,3 mm h⁻¹, evidenciando dessa maneira a importante função desempenhada pela cobertura vegetal no favorecimento à elevação da taxa de infiltração de água no solo.

Pesquisando sobre a infiltração de água em solo cultivado sob diferentes sistemas de manejo e rotação de culturas, Alves Sobrinho *et al.* (2003), utilizando infiltrômetro de aspersão calibrado para aplicar uma intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹, estimaram, para as áreas de plantio direto nas sucessões soja-nabo, soja-aveia, soja-pousio e área de plantio convencional, valores da taxa de infiltração estável iguais, respectivamente, a 31,5; 45,1; 22,6; e 14,50 mm h⁻¹. Silva (2003), trabalhando em condições semelhantes e no mesmo local, encontrou nas áreas de plantio convencional com ervilhaca 25,7 mm h⁻¹ e em pousio 13,9 mm h⁻¹, enquanto que nas áreas de plantio direto com ervilhaca obteve 28,7 mm h⁻¹ e em pousio 27,2 mm h⁻¹, evidenciando maiores valores de taxa de infiltração estável nas áreas de plantio direto.

O processo de infiltração da água no solo pode ser descrito por equações ou modelos, alguns desenvolvidos a partir de considerações físicas, enquanto outros o são de forma empírica. Um modelo empírico muito empregado, principalmente em manejo de irrigação, é a equação de Kostiaikov-Lewis normalmente utilizada para a estimativa da infiltração acumulada. Outro modelo é a equação de Horton, descrita na forma de uma função exponencial. Segundo o modelo de Horton, a redução na taxa de infiltração com o tempo é fortemente controlada por fatores que operam na superfície do solo, tais como selamento superficial, devido ao impacto das gotas de chuva, fenômenos de expansão e contração do solo (Prevedello, 1996). Esses modelos apresentam coeficientes que podem ser calculados a partir das equações teóricas ou serem estimados por meio de

regressão a partir de dados de infiltração medidos no campo. Alves Sobrinho *et al.* (2003), estudando a adequação das equações de Horton e Kostiakov-Lewis, sob condição de chuva simulada de 60 mm h⁻¹ em áreas de plantio direto e plantio convencional, concluíram que a equação de Horton mostrou-se mais adequada para a estimativa da taxa de infiltração de água.

Apesar da importância de se determinar as características de infiltração da água no solo, ainda são raros os trabalhos desenvolvidos com o uso de simuladores de chuva na região centro-sul do estado de Mato Grosso do Sul, onde o sistema de integração agricultura-pecuária, entendido como sistema conservacionista do solo, vem sendo bastante difundido. Dessa forma, desenvolveu-se este trabalho que teve como objetivos avaliar as características de infiltração de água no solo e a adequação dos modelos matemáticos de Horton e de Kostiakov-Lewis para a estimativa da taxa de infiltração em sistema de integração agricultura-pecuária e em pastagem contínua.

Material e métodos

O trabalho foi realizado em área experimental da Embrapa, em Dourados, MS (latitude Sul 22°14', longitude a Oeste de Greenwich 54° 49', e altitude média de 452 m), no período compreendido entre março e julho de 2003 em solo classificado como Latossolo Vermelho aluminoférrico típico de textura muito argilosa, com 710 g kg⁻¹ de argila, 175 g kg⁻¹ de silte e 115 g kg⁻¹ de areia. O clima regional, classificado pelo sistema internacional de Köppen, é do tipo Cwa, caracterizado como clima úmido e inverno seco, com precipitação média anual de 1500 mm e temperatura média anual de 22° C. A declividade média da área experimental é de 0,03 m m⁻¹.

Foi utilizado um infiltrômetro de aspersão denominado InfiAsper/UFMS, desenvolvido por Alves Sobrinho (1997), regulado para aplicar intensidades de precipitação de 60 e 100 mmh⁻¹ com pressão de serviço nos bocais dos aspersores de 32 kPa. A área de ação do infiltrômetro ou área da parcela experimental (0,70 m²), foi contornada por um dispositivo de formato retangular, construído em chapas de aço galvanizado número 16, para permitir a obtenção do volume de água escoado superficialmente. A lâmina de escoamento superficial era obtida pela relação entre o volume de água escoado e a área da parcela experimental. A diferença entre a lâmina de água aplicada e a lâmina de escoamento superficial, medida experimentalmente, correspondia à lâmina infiltrada. Vale dizer que, em virtude da curta duração dos testes, a evaporação e a transpiração foram desconsideradas.

A taxa de infiltração de água no solo foi avaliada em três sistemas distintos, denominados de Sistemas A, B e C. Na área experimental correspondente ao Sistema A, havia pastagem e, na área do Sistema B, aveia (15 dias após a emergência) cultivada sob o sistema de plantio direto, enquanto que na área do Sistema C havia pastagem contínua (cultivada desde 1995). As áreas dos Sistemas A e B foram cultivadas sob o sistema de integração agricultura-pecuária. O histórico de uso das áreas correspondentes aos sistemas de rotação, com as respectivas culturas que vem sendo utilizadas desde 1995, está apresentado no Tabela 1.

Tabela 1. Histórico das espécies vegetais cultivadas nos dois sistemas de cultivos utilizados na avaliação experimental, no período compreendido entre 1995 e 2003.

Ano	Sistemas			Ano	Sistemas		
	A	B	C		A	B	C
95	Milho	Milho	BD	99/00	Soja	BD	BD
95/96	Soja	BD	BD	00	Aveia	BD	BD
96	Aveia	BD	BD	00/01	Soja	BD	BD
96/97	Soja	BD	BD	01	Aveia	BD	BD
97	Aveia	BD	BD	01/02	BD	Soja	BD
97/98	BD ¹	Soja	BD	02	BD	Aveia	BD
98	BD	Aveia	BD	02/03	BD	Soja	BD
98/99	BD	Soja	BD	03	BD	Aveia	BD
99	BD	Aveia	BD				

¹BD: *Brachiaria decumbens*.

As parcelas experimentais utilizadas para avaliar a infiltração de água, correspondentes aos sistemas A, B e C em estudo, podem ser visualizadas na Figura 1.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com os tratamentos dispostos em esquema fatorial 2x3, correspondente a duas intensidades de precipitação e 3 sistemas de cultivo, com 3 repetições, totalizando 18 parcelas experimentais.

Momentos antes do início de cada teste de infiltração, para obtenção do volume de água infiltrado e escoado superficialmente, foram coletadas amostras de solo, em número de três repetições para a avaliação da umidade do solo, pelo método gravimétrico (padrão de estufa), nas seguintes profundidades: camada de 0 a 5; 5 a 10 e 10 a 20 cm.

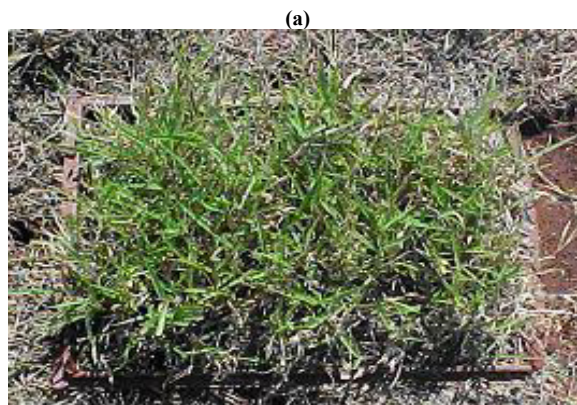




Figura 1. (a) Parcela do Sistema A, sob cultivo de pastagem; (b) parcela do Sistema B, com a cultura de aveia cultivada sob plantio direto e (c) parcela do Sistema C, sob cultivo de pastagem contínua.

A coleta do volume da água escoada, para cada teste, foi feita em calha coletora própria do infiltrômetro, em intervalos de tempo de 1, 2, 3, 5, 10 e 15 minutos, com 5 repetições em cada intervalo, até que o volume escoado superficialmente se tornasse constante. Em cada intervalo de tempo considerado, foi coletado e medido o volume de água escoado durante um minuto e o volume escoado era considerado estabilizado, ou constante no tempo, quando pelo menos três sucessivos valores medidos desse volume fossem iguais. O intervalo compreendido entre o início da aplicação da chuva simulada e o início da coleta foi identificado e registrado como tempo de início do escoamento superficial em cada parcela. Era verificada a intensidade de precipitação aplicada durante o mesmo. Durante o período de operação do simulador, a pressão de serviço era constantemente conferida (32 kPa) e, após as tomadas de dados em cada teste na parcela experimental, fazia-se a verificação da intensidade de precipitação real aplicada pelo simulador.

De forma a auxiliar as discussões dos resultados, após os testes de campo foram retiradas amostras indeformadas de solo das parcelas experimentais, em duas profundidades (0-5 e 5-20 cm – sendo os anéis

centrados a 2,5 e 12,5 cm), para análises físicas de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo de acordo com os critérios estabelecidos em Embrapa (1997). Determinou-se, ainda, a distribuição de agregados para essas duas profundidades. Para a determinação da distribuição de agregados pelo método de peneiramento úmido, foram retirados blocos de solo com estrutura natural que, após secados ao ar, foram passados em peneiras de 9,52 e 4,76 mm e empregados nas análises posteriores, os agregados retidos na peneira de 4,76 mm. A análise de estabilidade de agregados foi realizada procedendo-se ao peneiramento, durante 15 minutos, em jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5 e 0,105 mm, dentro do recipiente contendo água. Adotou-se, como índices de estabilidade, o diâmetro médio geométrico e o diâmetro médio ponderado, cujos cálculos foram feitos, seguindo-se a proposta de Kemper e Rosenau (1986).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, com a posterior aplicação do Teste de Tukey a 5% de significância para a comparação de médias. A análise estatística foi feita utilizando o programa SANEST (Sistema de Análise Estatística).

Com os dados de infiltração obtidos, foram ajustadas equações para taxa de infiltração conforme modelos propostos por Horton e Kostiakov-Lewis, descritos por Prevedello (1996). Os modelos de Horton e Kostiakov-Lewis, para infiltração acumulada em função do tempo, são representados pelas equações 1 e 2, respectivamente.

$$I = i_f t + \frac{i_o - i_f}{\beta} [1 - \exp(-\beta t)] \quad (1)$$

$$I = \kappa t^\alpha + i_f t \quad (2)$$

em que,

I = infiltração acumulada, mm

i_o = taxa de infiltração inicial, mm h⁻¹;

i_f = taxa de infiltração final, mm h⁻¹;

t = tempo de infiltração, h

α , β e κ = parâmetros determinados estatisticamente a partir de valores de I e t .

As equações utilizadas para estimar a taxa de infiltração em um determinado instante foram obtidas das equações (1) e (2), derivando-as em relação ao tempo. Desse modo, as equações de taxa de infiltração instantânea (i) para cada modelo podem ser representadas conforme as equações (3) e (4).

$$i = i_f + (i_o - i_f) \exp(-\beta t) \quad (3)$$

$$i = \alpha \kappa t^{\alpha-1} + i_f \quad (4)$$

Os parâmetros α , β e κ foram estimados,

utilizando-se o método de Gauss-Newton, minimizando-se a soma dos quadrados dos desvios em relação aos valores de infiltração obtidos com o infiltrômetro de aspersão, com o uso do programa computacional DataFit.

Foram utilizados na avaliação os seguintes índices estatísticos: coeficiente de massa residual (CMR), coeficiente de ajuste (CA) e eficiência (EF), representados pelas equações (5), (6) e (7):

$$CMR = \left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (5)$$

$$CA = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2 \quad (6)$$

$$EF = \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2 \right] / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \quad (7)$$

em que,

O_i = valor de infiltração observado;

P_i = valor de infiltração estimado;

n = número de observações;

\bar{O} = média aritmética das observações.

Com as equações de taxa de infiltração, foram gerados gráficos de taxa de infiltração em função do tempo, para os diferentes tratamentos, a fim de melhor analisar e discutir os resultados.

Resultados e discussão

Os valores médios observados para umidade inicial do solo, intensidades de aplicação real de água, energia cinética da chuva simulada na parcela e taxas de infiltração inicial e final, estão apresentados no Tabela 2.

Os valores obtidos para as intensidades de precipitação efetivamente aplicadas apresentaram-se ligeiramente diferentes dos que foram planejados, em função das características operacionais e da montagem do equipamento no campo.

Para a mesma intensidade de precipitação e no mesmo sistema, a umidade inicial do solo apresentou valores muito próximos nas três profundidades coletadas. Porém a variação de umidade inicial do solo, entre os testes correspondentes às intensidades de 60 mm h⁻¹ e 100 mm h⁻¹, possivelmente foi um dos fatores que favoreceu a ocorrência da expressiva diferença entre os intervalos de tempo para início do escoamento superficial de água no solo. Isso ocorreu porque os testes correspondentes à intensidade de 60 mm h⁻¹ foram conduzidos em um período bastante seco, enquanto que com a intensidade de 100 mm h⁻¹ foram realizados após um período chuvoso, o que

proporcionou maior umidade ao solo.

Observando-se os valores da taxa de infiltração inicial e estável (final) apresentados no Tabela 1, verifica-se que, à medida que se aumentou o valor da intensidade de precipitação, o valor da taxa de infiltração estável decresceu para as duas intensidades de precipitação aplicadas nos três sistemas de cultivo em estudo. Alves e Cabeba (1999), utilizando diferentes métodos de preparo do solo, observaram que, no preparo convencional, ocorreu diminuição significativa na taxa de infiltração à medida que a intensidade de precipitação variou de 63,4 mm h⁻¹ para 87,9 mm h⁻¹, enquanto que no plantio direto a taxa de infiltração estável não apresentou variação.

Analisando o Tabela 2, nos três sistemas de cultivo, observa-se ainda que, na área de agricultura, que estava sendo cultivada com aveia sobre a resteva de soja (Sistema B), houve maior variação na taxa de infiltração estável do que nas áreas com pastagem (Sistemas A e C) à medida que se promoveu o aumento da intensidade de chuva. Atribui-se esse processo à menor taxa de cobertura do solo, visto que, de acordo com Barcelos *et al.* (1999), os restos culturais sobre a superfície do solo interceptam e dissipam a energia cinética da chuva e do escoamento superficial, diminuindo a desagregação e o transporte de partículas, prevenindo a formação do selamento superficial, diminuindo a velocidade de escoamento, aumentando o tempo de contato da água com o solo e permitindo, portanto, maior infiltração de água no solo.

Tabela 2. Valores médios de umidade inicial do solo, intensidade de precipitação aplicada, tempo de início de escoamento superficial e valores médios das taxas de infiltração inicial e final para os tratamentos aplicados.

	Sistema A		Sistema B		Sistema C	
	Intensidade de precipitação prevista (mm h ⁻¹)					
	60	100	60	100	60	100
Profundidade (cm)	Umidade inicial do solo (% g g ⁻¹)					
0 – 5	24,24	31,95	20,74	30,23	23,64	31,09
5 – 10	25,07	30,54	20,36	29,77	24,59	30,71
10 – 20	25,50	29,69	21,57	29,41	25,02	30,99
	Intensidade de aplicação medida (mm h ⁻¹)					
	60,26	93,44	59,47	96,84	60,86	100,07
	Tempo de início do escoamento superficial (min)					
	18,32	1,48	58,27	3,87	12,7	1,16
	Tempo para atingir a taxa de infiltração final ou estável (min)					
	76	36	109	42	76	65
	Taxa de infiltração (mm h ⁻¹)					
Inicial (i ₀)	58,86	88,18	58,90	95,13	54,77	98,57
Final (i _f)	45,63 ^a	36,01Ba	49,24Aa	25,90Bb	42,86Aa	40,67Aa

Sistema A: Sistema de integração agricultura-pecuária com pastagem; Sistema B: Sistema de integração agricultura-pecuária com aveia; Sistema C: Sistema de cultivo sob pastagem contínua. Médias seguidas com a mesma letra maiúscula na mesma linha, para as duas intensidades de precipitação e no mesmo sistema, não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Tukey. Médias seguidas com a mesma letra minúscula na mesma linha, para a mesma intensidade de precipitação aplicada nos três sistemas, não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Para a intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹, os valores da taxa de infiltração estável não apresentaram diferença estatística entre os sistemas

em estudo. Em relação à intensidade de precipitação de 100 mm h⁻¹, o sistema que estava sendo cultivado com aveia (Sistema B) apresentou taxa de infiltração estável menor do que nos sistemas de integração com pastagem (sistema A) e pastagem contínua (sistema C). Os sistemas sob pastagem (Sistemas A e C) não diferiram entre si com relação à aplicação de 100 mm h⁻¹ de chuva simulada.

Mesmo para as situações em que não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos, pode-se observar que existiu uma tendência de maior infiltração de água (Tabela 2) para os tratamentos com os menores valores de densidade do solo e maiores valores de macroporosidade na camada de 0 a 5 cm do solo (Tabela 3). Esse fato pode ser atribuído à influência do sistema radicular das gramíneas, que geralmente contribuem para uma melhor estruturação do solo, principalmente pela deposição de matéria orgânica, pois, segundo Vitorino (1986), as maiores densidades nas posições mais profundas podem ser decorrentes da redução da matéria orgânica. Nas áreas de cultivo em que havia pastagem, o sistema radicular estava bem desenvolvido ao longo de todo o perfil, com grande concentração nos primeiros 20 cm.

Analisando-se os dados obtidos (Tabela 3), verifica-se que, para a densidade do solo, microporosidade e volume total de poros do solo, não houve diferença significativa nos três sistemas, considerando as duas profundidades avaliadas.

Tabela 3. Valores médios da densidade do solo, macroporosidade do solo, microporosidade do solo e volume total de poros (VTP) nas profundidades de 0 a 5 cm e de 5 a 20 cm, correspondentes aos três sistemas de cultivo.

Sistema	Densidade do solo (Mg m ⁻³)		Macroporosidade (%)		Microporosidade (%)		VTP (%)	
	Profundidade (cm)							
	0-5	5-20	0-5	5-20	0-5	5-20	0-5	5-20
A	1,29Aa	1,27Aa	10,53Ba	13,66Aa	46,34Aa	44,61Aa	56,87Aa	58,67Aa
B	1,25Aa	1,37Aa	15,78Aa	6,84Bb	43,83Aa	47,19Aa	59,62Aa	54,04Aa
C	1,35Aa	1,29Aa	7,17Ba	9,43Ba	47,96Aa	47,54Aa	55,13Aa	56,97Aa

Sistema A: Pastagem no sistema de integração agricultura-pecuária; Sistema B: Plantio direto com resteva de soja no sistema de integração agricultura-pecuária; Sistema C: Pastagem contínua. Médias seguidas com a mesma letra maiúscula na mesma coluna e minúscula na mesma linha, para a mesma variável, não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Os maiores valores obtidos para o diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado (Tabela 4) estão associados aos sistemas que apresentaram menor variação na taxa de infiltração de água no solo (Tabela 2), quando foram submetidas a diferentes intensidades de precipitação. Esse fato demonstra que os sistemas com maiores valores para esses índices e, portanto, com melhor estabilidade de agregados, são mais resistentes à desagregação superficial.

Tabela 4. Valores médios de diâmetro médio geométrico (DMG) e

de diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados, em duas profundidades, dos diferentes sistemas, submetidos às diferentes intensidades de precipitação.

	Sistemas	Intensidade de precipitação (mm h ⁻¹)							
		40		60		80		100	
		Profundidade (cm)							
		0-5	5-20	0-5	5-20	0-5	5-20	0-5	5-20
DMG (mm)	A	2,23A	0,89A	2,77B	1,29B	2,71A	1,26A	2,51B	1,37B
	B	1,65B	0,85A	1,78C	0,63C	1,71B	1,12A	1,99C	1,00C
	C	-	-	4,25A	3,45A	-	-	4,12A	3,58A
DMP (mm)	A	3,65 ^A	1,95A	3,98B	2,51B	4,00A	2,25A	3,89B	2,66B
	B	2,79B	1,61A	2,98C	1,19C	2,14B	1,94A	3,10C	1,92C
	C	-	-	4,61A	4,26A	-	-	4,53A	4,15A

Médias seguidas com a mesma letra maiúscula na mesma coluna, para a mesma variável, não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Comparando somente os sistemas cultivados na integração agricultura-pecuária, observa-se (Tabela 3) que o Sistema A apresentou, na camada de 0 a 5 cm, os maiores valores de DMG e DMP em relação ao Sistema B. Nos tratamentos em que o sistema C também foi analisado, este foi o que apresentou os maiores valores de DMG e DMP. Essa diferença entre os sistemas representa uma melhor estrutura física nas áreas sob pastagem, principalmente no caso da pastagem contínua, possivelmente ocasionada pela ação do sistema radicular das gramíneas e da maior taxa de matéria orgânica que atua como elemento estabilizador dos agregados, promovendo a formação de agregados maiores e mais estáveis.

Evidencia-se, através da análise dos resultados, a interferência de alguns atributos do solo na magnitude da taxa de infiltração final, especialmente a macroporosidade, a densidade do solo e a estabilidade de agregados.

A pastagem contínua proporcionou condições mais favoráveis à infiltração de água no solo, considerando a maior intensidade de precipitação testada (100 mm h⁻¹), sobretudo pela quantidade de palha existente na superfície do solo associada com o seu desenvolvimento radicular, o que reduz o problema relativo ao selamento superficial.

Como pode ser observado, analisando-se o Tabela 2, as áreas de integração com pastagem (Sistema A) e com aveia (Sistema B) apresentaram maior taxa de infiltração estável com o uso da menor intensidade de precipitação (60 mm h⁻¹). Na pastagem contínua (Sistema C), não houve diferença na taxa de infiltração estável para as duas intensidades de precipitação aplicadas. Esses resultados evidenciam a importância da cobertura vegetal e do sistema radicular na magnitude da infiltração de água em sistemas agrícolas.

Os parâmetros α , β e κ , ajustados para os modelos apresentados nas equações 3 e 4, e os índices estatísticos

estão apresentados na Tabela 5. As equações completas de Horton e Kostiakov-Lewis ajustadas estão apresentadas na Tabela 6.

Analisando-se o coeficiente de massa residual (CMR), observa-se que a equação de Horton subestima a taxa de infiltração estável, comportamento indicado pelos valores positivos do índice CMR, com exceção dos resultados para os sistemas A e C, ao receberem a intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹, e para o sistema B, em que a equação de Horton superestimou a taxa de infiltração estável. A equação de Kostiakov-Lewis superestimou a taxa de infiltração estável em todos os tratamentos, comportamento esse indicado pelos valores negativos do índice CMR. Esse índice estatístico também confirma o melhor ajuste da equação de Horton, pois apresentou desvios mais próximos de zero.

Tabela 5. Parâmetros e índices estatísticos obtidos da estimativa da taxa de infiltração estável pelas equações de Horton e Kostiakov-Lewis.

Parâmetros e índices	Sistema A		Sistema B		Sistema C	
	Intensidade de Precipitação (mm h ⁻¹)					
	60	100	60	100	60	100
	Modelo de Horton					
β	0,04794	0,17059	0,01526	0,11736	0,02159	0,08599
CMR	-0,00297	0,00817	0,00225	0,00286	-0,00247	0,00841
CA	0,76234	1,38100	1,68508	1,66114	1,30287	0,89728

Tabela 6. Equações de Horton e Kostiakov-Lewis ajustadas a partir dos dados observados.

Tratamentos	Modelos	
	Horton	Kostiakov-Lewis
Sistema A (60 mmh ⁻¹)	$i = 45,63+13,23 \text{ Exp.}(-0,04794t)$	$i = 45,63+14,59126 t^{-0,41017}$
Sistema A (100 mmh ⁻¹)	$i = 36,01+52,17 \text{ Exp.}(-0,17059t)$	$i = 36,01+56,33731 t^{-0,7744}$
Sistema B (60 mm h ⁻¹)	$i = 49,24+ 9,66 \text{ Exp.}(-0,01526t)$	$i = 49,24+13,37054 t^{-0,27766}$
Sistema B (100 mm h ⁻¹)	$i = 25,90+69,23 \text{ Exp.}(-0,11736t)$	$i = 25,90+81,052554 t^{-0,64727}$
Sistema C (60 mm h ⁻¹)	$i = 42,86+11,91 \text{ Exp.}(-0,02159t)$	$i = 42,86+15,37461 t^{-0,31664}$
Sistema C(100 mm h ⁻¹)	$i = 40,67+57,90 \text{ Exp.}(-0,08599t)$	$i = 40,67+64,10922 t^{-0,55337}$

As curvas de taxa de infiltração estimadas pelos modelos de Horton e Kostiakov-Lewis, utilizando-se os dados observados nas determinações de campo, estão apresentados na Figura 2. Pode-se afirmar que, de modo geral, a qualidade do ajuste dos modelos foi satisfatória, apresentando, em todos os tratamentos, melhores ajustes da equação de Horton em relação à equação de Kostiakov-Lewis. Tal afirmação se baseia na análise dos coeficientes de

EF	0,00424	0,00031	0,00326	0,00012	0,00265	0,00018
	Modelo de Kostiakov-Lewis					
α	0,58983	0,22560	0,72234	0,35273	0,68336	0,44663
κ	24,73808	249,72211	18,51004	231,12733	22,49855	143,53990
CMR	-0,00333	-0,02573	-0,00312	-0,05300	-0,0045	-0,02016
CA	1,41895	1,27276	2,34914	1,61838	2,08693	1,31612
EF	0,00424	0,00031	0,00326	0,00012	0,00264	0,00017

O coeficiente de ajuste (CA) foi, em geral, melhor na equação de Horton, pois esse modelo matemático apresentou valores, para os três sistemas avaliados e para as duas intensidades de precipitação, mais próximos da unidade. O índice de eficiência (EF) foi semelhante nas duas equações, mostrando que não houve diferença entre elas e entre os tratamentos.

Urchei e Fietz (1999), utilizando infiltrômetro de duplo cilindro para obtenção de dados de campo sobre infiltração em solo classificado como Latossolo Roxo, avaliaram a adequação das equações de Horton e de Kostiakov-Lewis e concluíram que a equação de Kostiakov-Lewis é mais adequada para estimar a taxa de infiltração nessas condições. Trabalhando em dois sistemas de manejo do solo, Alves Sobrinho *et al.* (2003) e Silva (2003), através do uso de um simulador de chuvas, avaliaram também a adequação das equações de Horton e de Kostiakov-Lewis e concluíram que, para estimar a taxa de infiltração, nessas condições, a equação de Horton é a mais adequada.

determinação (R^2) das regressões não-lineares ajustadas em cada tratamento estudado, com destaque para a equação de Horton, que apresentou valores de R^2 sempre acima de 88%. Pode-se constatar visualmente que, para o mesmo sistema em estudo, à medida que é aumentada a intensidade de precipitação, há uma tendência de redução na taxa de infiltração estável, conforme equações contidas na Tabela 2.

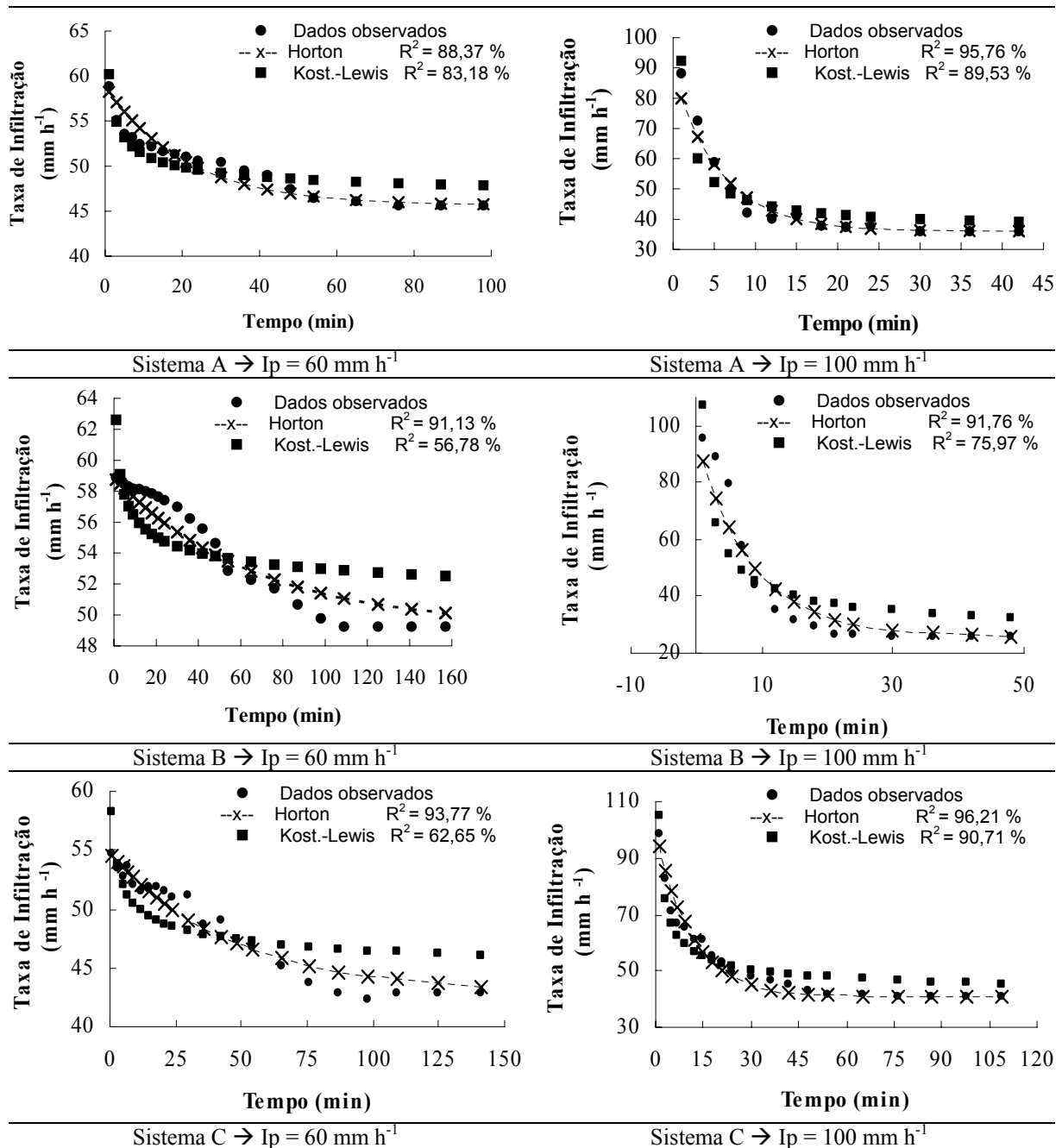


Figura 2. Curvas de taxa de infiltração observadas e estimadas pelos modelos de Horton e de Kostiakov-Lewis para os três sistemas de cultivo estudados e para as duas intensidades de precipitação, em função do tempo de coleta.

Conclusão

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que: a) o sistema de cultivo da aveia sob plantio direto, na integração agricultura-pecuária, apresentou a maior taxa de infiltração estável quando submetido à intensidade de precipitação de 60 mm h⁻¹ e menor taxa de infiltração quando submetido à intensidade de precipitação de 100 mm h⁻¹; b) o modelo de Horton foi mais adequado no ajuste dos dados de infiltração, em todos os tratamentos estudados.

Referências

- ALVES SOBRINHO, T. *Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil*. 1997. Tese (Doutorado)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- ALVES SOBRINHO, T. *et al.* infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.
- ALVES, M.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em

- um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 23, p. 753-761, 1999.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; RIBEIRO, M.R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixo Irecê (Ba). *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 20, p. 263-370, 1996.
- BARCELOS, A.A. et al. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo, *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 23, p. 35-43, 1999.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Sci. Agric.*, Piracicaba, v. 58, n. 3, 2001.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. São Paulo: Ícone, 1990.
- CHAVES, H.M.L. et al. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. *Rev. Bras. Cienc. Solo*. Campinas, v. 17, p. 141-147, 1993.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos (Rio de Janeiro). *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- EVERTS, C.J.; KANWAR, R.S. Interpreting tension-infiltrometer data for quantifying soil macropores: some practical considerations. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, v. 36, p. 423-428, 1992.
- KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of América, 1986, p. 425-441.
- KLAR, A.E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo, Nobel, 1984.
- PERROUX, K. M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 52, p. 1205-1215, 1988.
- POTT, C. A.; DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 27, p. 19-27, 2003.
- PREVEDELLO, C.L. *Física do solo com problemas resolvidos*. Ed. SAEAFS. Curitiba, 1996.
- PRUSKI, F.F. et al. Infiltração da água no solo. *Engenharia na Agricultura*. Caderno Didático 25, 1997.
- REICHARDT, K. Infiltração da água no solo. In: *Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas*. 2. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996, p. 317-352.
- REICHERT, J.M. et al. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 16, p. 289-298, 1992.
- ROTH, C.H. et al. A portable rainfall simulator for studying factors affecting runoff, infiltration e soil loss. *Catena*, Amsterdam, v. 12, p. 79-85, 1985.
- SALES, L.E.O. et al. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2091-2095, 1999.
- SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Infiltration measurements with double ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface conditions on an Oxisol. *Soil Tillage Res.*, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 161-168, 1987.
- SILVA, L.C.; KATO, E. Avaliação de modelos para a previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, 1998.
- SILVA, C.G. *Perdas de solo e de água e características de infiltração em sistemas de plantio direto e convencional*. 2003. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Dourados, 2003.
- URCHEI, M.A.; FIETZ, C.R. Estimativa de infiltração básica de um Latossolo Roxo muito argiloso em dois sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1999, Pelotas. *Anais... Pelotas*: SBEA, 1999a. (Pub. CD-Room).
- VITORINO, A.C.T. *Caracterização e interpretação, para uso agrícola, de solos de terraço fluvial, no médio Rio Doce, Município de Córrego Novo, MG*. 1986. Dissertação (Mestrado). Viçosa, 1986.

Received on July 20, 2004.

Accepted on December 12, 2005.