

VIVIANE DOS SANTOS BRANDÃO

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS SUJEITOS A ENCROSTAMENTO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Doctor Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B817i
2003

Brandão, Viviane dos Santos, 1974-
Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento /
Viviane dos Santos Brandão. – Viçosa : UFV, 2003.
68p. : il.

Orientador: Demétrius David da Silva
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Crostas - Efeito sobre a infiltração - Modelos matemáticos. 2. Solos - Permeabilidade. 3. Simuladores de chuva. 4. Solos - Análise micromorfológica. 5. Física do solo. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 631.432

CDD 20.ed. 631.432

VIVIANE DOS SANTOS BRANDÃO

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS SUJEITOS A ENCROSTAMENTO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Doctor Scientiae”.

APROVADA: 05 de setembro de 2003

Prof. Fernando Falco Pruski
(Conselheiro)

Prof. Hugo Alberto Ruiz
(Conselheiro)

Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

Prof. Carlos Ernesto G. R. Schaefer

Prof. Demetrius David da Silva
(Orientador)

A minha mãe e irmãos Lílian, Vinicius e Luis Paulo, que sempre estiveram ao meu lado mesmo quando eu estava distante.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade deste momento.

Aos meus pais Paulo Norberto Bueno Brandão (*in memoriam*) e Norma dos Santos Brandão, pelo amor e dedicação incondicionais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão das bolsas de estudo de iniciação científica, mestrado e doutorado, que tornaram viável a minha formação profissional.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e aos Departamentos de Engenharia Agrícola e de Solos, pelas condições de realização deste trabalho.

Ao meu orientador Demetrius David da Silva, pelas demonstrações de amizade, confiança e respeito, que sempre prevaleceram no nosso convívio.

Aos professores Fernando Falco Pruski, Hugo Alberto Ruiz e Carlos Ernesto G. R. Schaefer, pelas preciosas colaborações na realização deste trabalho e pelo incentivo.

Ao Sr. Expedito José Ferreira da CODEVASF e ao aluno Flávio Gonçalves de Oliveira, pela fundamental ajuda na coleta de amostras de solo nas áreas da EPAMIG no Norte de Minas.

Aos meus avós Moysés, Francisca e Maria, pelos mimos.

Aos meus amigos Paola Lo Mônaco, Nelci Olszewski, Guilherme Cadinelli e Larissa Haddad, pelos inesquecíveis momentos de convívio e alegria.

Aos amigos de curso Patrícia, Suzana, Guilhaerminho, Salomão, Geraldo, Edson,

Aos colegas do GPRH Ricardo Amorim, Ana Esméria, Nori Grieleber, Luis Tomás, Luis Gustavo, Roberto Cecílio, José Márcio, Alessandro, Flávio, Silvio Bueno e Renata.

Aos meus amigos da UFV Silvane, Cláudia, Marcelo Metri e Oldair, pelo apoio técnico e moral nesta empreitada.

Aos bolsistas e estagiários Sady Junior, Eduardo, João Paulo, Leônidas e Glécio, pela preciosa ajuda e agradáveis horas de convívio e aos alunos de graduação Danilo e André, pelo apoio moral.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, Chicão e Seu Antonio, pela paciência e ajuda imprescindíveis na realização do experimento.

Aos funcionários Gilberto e Luciano, pela força física e moral para realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

VIVIANE DOS SANTOS BRANDÃO, filha de Paulo Norberto Bueno Brandão e Norma dos Santos Brandão, nasceu na cidade do Rio de Janeiro, RJ, no dia 28 de agosto de 1974.

Em maio de 1992, iniciou o Curso de Graduação em Agronomia na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em Seropédica, RJ, graduando-se em março de 1997.

Em março de 1997, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, concentrando seus estudos na área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, tendo concluído o curso em agosto de 1999.

Em setembro de 1999, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, concentrando seus estudos na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Em dezembro de 2003, foi aprovada em concurso público para o cargo de Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	04
2.1. Infiltração da água no solo	04
2.1.1. Características do solo	04
2.1.2. Características da cobertura do solo	06
2.1.3. Tipo de preparo e manejo do solo	07
2.2. Encrostamento	08
2.3. Modelos de infiltração	11
2.3.1. Modelo de Green e Ampt	12
2.3.2. Modelo de Green e Ampt modificado por Mein e Larson	13
2.4. Modelos de infiltração para solos com encrostamento	14
2.5. Métodos para determinação da infiltração	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Descrição do experimento	21
3.2. Descrição do simulador de chuvas	24
3.3. Determinação da taxa de infiltração	26
3.4. Determinação das perdas de solo	29
3.5. Análises físicas do solo após a aplicação da chuva simulada	29

3.5.1. Análise da porosidade total, macro e microporosidade	29
3.5.2. Análise micromorfológica.....	31
3.6. Determinação da condutividade e resistência hidráulica da crosta.....	33
3.7. Análises estatísticas.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Taxa de infiltração	35
4.2. Perdas do solo	37
4.3. Porosidade total, macro e microporosidade.....	39
4.4. Espessura da crosta	42
4.5. Condutividade hidráulica da crosta	49
4.6. Resistência hidráulica da crosta.....	51
5. RESUMO E CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICES	61
APÊNDICE A	62
APÊNDICE B	65

RESUMO

BRANDÃO, Viviane dos Santos, D.S., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2003. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento.** Orientador: Demetrius David da Silva. Conselheiros: Fernando Falco Pruski, Hugo Alberto Ruiz e Mauro Aparecido Martinez.

A redução da macroporosidade da camada superficial do solo provocada pelo encrostamento tem como conseqüência o decréscimo da infiltração da água no solo. Para a determinação da taxa de infiltração, em solos sujeitos ao encrostamento, foi realizado experimento no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola utilizando simulador de chuvas. Os tratamentos foram distribuídos em um esquema fatorial 5 x 6, sendo cinco solos (Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Flúvico e Neossolo Quartzarênico) e seis energias cinéticas de chuva (0, 525, 1051, 2102, 3153 e 4204 J m⁻²) com três repetições, conforme um delineamento inteiramente casualizado. Utilizando técnica de micromorfometria foi possível determinar algumas características do microporfil da camada superficial do solo, tais como macroporosidade, distribuição dos poros e sua continuidade e, ainda, a espessura da crosta. A partir dos dados de taxa de infiltração da água no solo e da espessura da crosta, calcularam-se a condutividade e a resistência hidráulica da crosta. Tendo sido ajustada

equação relacionando a resistência hidráulica da crosta com a energia cinética da chuva e as características químicas e físicas de cada solo. Observou-se que, para todos as classes de solo, houve redução da taxa de infiltração quando foram aplicados valores crescentes de energia cinética, o que evidenciou o desenvolvimento de encrostamento. Os maiores valores de taxa de infiltração foram obtidos para o Neossolo Quartzarênico ($0,875 \text{ kg kg}^{-1}$ de areia) e para o Latossolo Vermelho-Amarelo, devido a sua estrutura microgranular. A resistência hidráulica da crosta aumentou com a energia cinética para todos os solos (especialmente para o Argissolo Vermelho-Amarelo e o Argissolo Vermelho) até atingir um valor máximo para energias próximas de 2274 J m^{-2} . A partir deste valor, evidenciou-se a diminuição da resistência hidráulica decorrente do desgaste da crosta provocado pelo aumento do escoamento superficial. Análises de regressão múltipla mostraram que as variáveis mais efetivas na descrição do comportamento da resistência hidráulica da crosta foram a energia cinética aplicada, a macroporosidade da camada de 0-5cm, os teores de areia total, silte e carbono orgânico e a relação entre os teores de argila dispersa em água e a argila total. Desta forma, a partir da equação ajustada e do conhecimento de algumas características do solo e da chuva é possível estimar a resistência hidráulica da crosta desenvolvida pelo impacto direto da gota e, conseqüentemente, a taxa de infiltração em solos sujeitos ao desenvolvimento de encrostamento.

ABSTRACT

BRANDÃO, Viviane dos Santos, D.S., Universidade Federal de Viçosa, September 2003. **Infiltration of water in crusting soils.** Adviser: Demetrius David da Silva. Committee Members: Fernando Falco Pruski, Hugo Alberto Ruiz and Mauro Aparecido Martinez.

Macroporosity reduction of the soil surface layer caused by crusting leads to decreased water infiltration into soil. An experiment was carried out at the Hydraulics Laboratory of the Agricultural Engineering Department using a rainfall simulator to determine infiltration rates in crusting soils. A completely random 5x6 factorial design was established using five soils (Red Ultisol, Red-Yellow Ultisol, Red-Yellow Oxisol, Fluvic Entisol and Arenic Entisol) and six rainfall kinetic energies (0, 525, 1051, 2102, 3153 and 4204 J m⁻²) with three repetitions. Some characteristics of the soil surface layer, such as macroporosity, pore distribution and pore continuity and crust thickness, were determined using the micromorphometry technique. Crust hydraulic conductivity and hydraulic resistance were calculated based on water infiltration rate and crust thickness. These results were used to establish equations relating crust hydraulic resistance to rainfall kinetic energy and chemical and physics characteristics of each soil. In all soil classes the infiltration rate decreased with the increase in kinetic energy, proof of crust development. The highest infiltration rates were obtained for the Arenic Entisol (0,875 kg kg⁻¹ of sand) and the Red-

Yellow Oxisol, due to their micro-granular structure. Crust hydraulic resistance increased with increasing kinetic energy for all soils (especially for the Red-Yellow Ultisol and Red Ultisol) until reaching a maximum value at an energy of about 2274 J m^{-2} . The following decrease in hydraulic resistance was attributed to crust erosion caused by increasing runoff. Multiple regression analyses showed that the most effective variables for describing crust hydraulic resistance were rainfall kinetic energy, macroporosity of the 0-5cm layer, the levels of total sand, silt and organic carbon and the relationship among the levels of dispersed clay in the water and total clay. Therefore, it is possible to estimate the crust hydraulic resistance developed by direct water droplet impact and consequently infiltration rate in crusting soils by using adjusted equations based on some soil and rainfall characteristics.

1. INTRODUÇÃO

A infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo. Muitos são os fatores que interferem neste processo, dentre os quais destacam-se aqueles relacionados com as características do solo e da cobertura vegetal, bem como aqueles relacionados às características da precipitação.

A formação de crosta decorrente do impacto das gotas da chuva é um dos fatores que pode reduzir acentuadamente a infiltração e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial, contribuindo para a erosão do solo.

Muitos são os modelos desenvolvidos para estimar a infiltração da água no solo e, de acordo com a sua natureza, podem ser classificados em empíricos e teóricos. Dentre os modelos teóricos se destacam o de Green e Ampt e o de Green e Ampt modificado por Mein e Larson (GAML) (MEIN e LARSON, 1973). Estes modelos, apesar de serem baseados em equações que descrevem o movimento da água em meios porosos, comumente superestimam a infiltração por não incorporarem na sua estrutura o efeito do encrostamento.

O encrostamento é resultante de processos complexos e dinâmicos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até valores superiores a 50 mm. Apesar da sua espessura relativamente pequena, suas propriedades

físicas e hídricas são restritivas à passagem da água para dentro do perfil do solo.

No processo de formação do encrostamento três eventos são essencialmente importantes: a quebra dos agregados pelo impacto das gotas de chuva com as partículas finas e dispersas sendo iluviadas a poucos milímetros abaixo da superfície, causando o entupimento dos poros do solo; a compactação da camada superficial do solo pelo impacto das gotas d'água, produzindo uma camada delgada de solo expressivamente adensada; e a deposição do material fino em suspensão, com a conseqüente orientação das partículas de argila. Estes eventos, que podem ocorrer simultaneamente ou isoladamente, levam a uma considerável redução da macroporosidade da camada superficial do solo.

No intuito de proteger a superfície do solo do impacto direto das gotas de chuva e, conseqüentemente, reduzir o desenvolvimento da crosta, muitos trabalhos vêm ressaltando a importância de práticas conservacionistas do solo como a manutenção de cobertura vegetal, que também favorece o aumento da macroporosidade na camada superficial.

Não só as características do solo e da cobertura vegetal determinam o grau de encrostamento, mas também as características da chuva. Dentre estas, a energia cinética das gotas tem se tornado a mais comumente associada com a formação do encrostamento. Em princípio, à medida que a energia cinética aumenta há uma redução progressiva da condutividade hidráulica do solo.

A avaliação do desenvolvimento do encrostamento pode ser feita por meio de características físicas e hídricas do solo, tais como, infiltração e condutividade hidráulica; ou por intermédio de observações morfológicas da crosta usando técnicas de microscopia, que permitem avaliar a sua espessura, a macroporosidade, a distribuição, a forma e a continuidade dos poros. Poucos são os trabalhos, entretanto, que tentam relacionar características físicas e hídricas do solo a aspectos micromorfológicos. Esta relação pode ser muito interessante no emprego dos modelos de infiltração em solos sujeitos a encrostamento, uma vez que a determinação das características físicas e hídricas da crosta é essencial para a incorporação do seu efeito à estrutura do modelo.

Neste sentido, os objetivos do presente trabalho foram:

- avaliar a taxa de infiltração em solos sujeitos a encrostamento submetidos a diferentes energias cinéticas de chuva simulada;
- avaliar, por meio de análise micromorfológica, as características físicas e hídricas de crosta formada decorrente de aplicação de chuva simulada; e
- estabelecer modelo matemático que relacione a resistência hidráulica da crosta com as características físicas e químicas do solo e a energia cinética da chuva.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Infiltração da água no solo

A infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo. O conhecimento deste processo é de fundamental importância por ser um dos principais determinantes do escoamento superficial, que é responsável por processos indesejáveis como a erosão hídrica e as inundações. A infiltração determina também o balanço de água na zona radicular e, por isso, o conhecimento da sua relação com as propriedades do solo é importante para o eficiente manejo do solo e da água em sistemas agrícolas.

Muitos são os fatores que interferem na infiltração da água no solo, dentre os quais destacam-se aqueles relacionados com as características do solo e da cobertura vegetal, bem como aqueles relacionados às características da precipitação.

2.1.1. Características do solo

A textura e a estrutura são as características que mais influenciam a movimentação da água no solo, uma vez que determinam a quantidade de macroporos do solo, que é um fator determinante da condutividade hidráulica do solo. Também interferem expressivamente na infiltração a distribuição, a forma e a continuidade dos poros.

Solos de textura grossa (arenosos) possuem maior quantidade de macroporos do que solos de textura fina (argilosos) e, conseqüentemente,

apresentam, quando saturados, maiores valores de condutividade hidráulica e taxa de infiltração.

Por outro lado, solos argilosos bem estruturados (estrutura estável) podem apresentar taxas de infiltração tão altas quanto as dos solos arenosos e apresentam, seguramente, taxas de infiltração maiores do que os solos argilosos com estrutura instável, que sofrem dispersão quando umedecidos ou submetidos a algum agente desagregador.

O grau de resistência ou vulnerabilidade do solo a ação de forças externamente impostas como, por exemplo, o impacto da gota de chuva, é definido pela estabilidade dos agregados. Assim, quanto maior a resistência do agregado à desestruturação, tanto menor será a formação do encrostamento, uma vez que uma das principais etapas de sua formação consiste na quebra dos agregados pelo impacto das gotas de chuva (HILLEL, 1980a).

A estabilidade de agregados é determinada por agentes cimentantes, que são basicamente representados pela matéria orgânica e pelos óxidos de Fe e Al. Os óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsita) são os minerais secundários de maior importância nos solos tropicais, sendo o produto final do intemperismo avançado dos solos. Desta forma, à medida que aumenta a presença destes compostos no solo, maior é a possibilidade deste apresentar uma estrutura mais estável (SHAINBERG e LEVY, 1995; SILVA e KATO, 1997). Um exemplo disto são os solos encontrados no cerrado brasileiro, para os quais a estrutura do solo pode exercer influência muito mais expressiva na taxa de infiltração do que a textura.

Sabe-se também que os agregados dos solos em que a argila predominante é a caulinita são mais estáveis do que aqueles em que a argila predominante é a montmorilonita (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990). A caulinita é um mineral 1:1 que constitui um estágio mais avançado de intemperismo em relação aos outros minerais de argila silicatados. Em função disto, os solos ricos em argilas do tipo 2:1 tendem a formar crostas mais duras do que aqueles ricos em argilas do tipo 1:1 (SHAINBERG e LEVY, 1995), mas isto não é consenso entre os pesquisadores.

REICHERT et al. (1992) constataram que solos argilosos ricos em caulinita possuem maior resistência à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e menor encrostamento, mantendo as taxas de infiltração mais elevadas

quando comparadas com solos esmectíticos (com menor grau de intemperismo). Estes resultados corroboraram aqueles encontrados por ALBUQUERQUE et al. (2000) para solos do Rio Grande do Sul e SILVA e KATO (1997) para solos do cerrado brasileiro.

2.1.2. Características da cobertura do solo

A natureza da superfície considerada é fator determinante no processo de infiltração. Áreas urbanizadas apresentam menores taxas de infiltração que áreas agrícolas por apresentarem altas percentagens de impermeabilização da superfície do solo, o que limita a sua capacidade de infiltração. Além disso, em áreas cultivadas o sistema radicular das plantas cria caminhos preferenciais que favorecem o movimento da água (BRANDÃO et al., 2003).

Muitos trabalhos têm ressaltado a importância da manutenção de cobertura vegetal para a conservação do solo (DULEY, 1939; McINTYRE, 1958a; BERTOL et al., 1989; FARIA et al., 1998; SILVA e KATO, 1998; SILVA et al., 2001). A cobertura vegetal aumenta a macroporosidade da camada superficial e protege os agregados do impacto direto das gotas de chuva sendo, desta forma, capaz de manter altas taxas de infiltração e diminuir, consideravelmente, as perdas de água e solo.

OLIVEIRA (2000) avaliou a taxa de infiltração da água em um solo com diferentes tipos de cobertura utilizando um simulador de chuva com intensidade de aplicação de 70 mm h^{-1} (Quadro 2.1). O autor verificou que as maiores taxas de infiltração foram observadas em solos com cobertura vegetal, com destaque para as parcelas com mucuna (*Stizolobium* spp.) e vegetação espontânea. Esse comportamento foi atribuído às características do sistema radicular da mucuna e da vegetação espontânea predominante (caruru-de-porco, *Amaranthus spinosus* L.). Durante o crescimento das raízes, criaram-se canais que favoreceram o movimento da água no perfil. O autor ressalta também que o número de plantas nas unidades experimentais com vegetação espontânea era apreciavelmente superior ao daquelas com mucuna. Em consequência, o autor sugeriu a existência de uma maior quantidade de canais biológicos, que teriam sido responsáveis pela maior taxa de infiltração neste tratamento.

Quadro 2.1. Taxa de infiltração estável, expressos em mm h^{-1} , em função do tipo de cobertura do solo

Cobertura	Taxa de infiltração estável
Sem cobertura	27,5
Vegetação espontânea	47,6
Mucuna	45,7
Milho	32,5

Fonte: OLIVEIRA (2000).

2.1.3. Tipo de preparo e manejo do solo

O preparo do solo, de modo geral, tende a aumentar a capacidade de infiltração, em razão da quebra da estrutura da camada superficial. No entanto, se as condições de preparo e manejo do solo forem inadequadas, sua capacidade de infiltração poderá tornar-se inferior à de um solo sem preparo, principalmente, se a cobertura vegetal presente sobre o solo for removida (BRANDÃO et al., 2003).

Segundo alguns autores (Tisdall e Oades, citados por SILVA et al., 1998), a estabilidade de microagregados é pouco influenciada por diferentes práticas agrícolas e por mudanças no conteúdo de matéria orgânica de solos causada pelo cultivo, sendo, portanto, relativamente permanentes ou estáveis. Com relação aos macroagregados, no entanto, a estabilidade destes é mais suscetível de ser influenciada pelo manejo do solo, aumentado com o aporte de matéria orgânica ao solo.

SILVA e KATO (1997) avaliaram a infiltração em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso sujeito a três condições diferentes de manejo: sistema de cultivo convencional, plantio direto e cerrado virgem. Os autores verificaram que os parâmetros físicos e hídricos que mais influenciam na infiltração (macroporosidade e condutividade hidráulica) foram bem maiores no local onde prevalecia a cobertura natural do solo (cerrado virgem). Nesta condição, a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) foi cerca de 20 vezes maior do que na área de plantio direto e três vezes maior do que na área com manejo convencional.

ALVES e CABEDA (1999) avaliaram a infiltração em um Podzólico Vermelho-Escuro sob preparo convencional e plantio direto usando chuvas simuladas com intensidades médias constantes de 63,0 e 87,0 mm h^{-1} . Os autores verificaram que a taxa de infiltração estável foi maior na condição de

plantio direto do que no plantio convencional e que no plantio direto não houve diferença na taxa de infiltração para as duas intensidades. No entanto, para o preparo convencional, a taxa foi menor sob a chuva de maior intensidade (Quadro 2.2).

Quadro 2.2. Taxas de infiltração estável sob condições de preparo convencional e plantio direto e duas intensidades de precipitação

Intensidade de precipitação	Taxa de infiltração estável	
	Preparo convencional	Plantio direto
	mm h ⁻¹	
63	27,5	46,6
87	17,3	47,2

Fonte: ALVES e CABEDA (1999).

2.2. Encrostamento

O encrostamento é resultante de processos dinâmicos complexos nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa, cuja espessura pode variar de 0,1 mm até valores superiores a 50 mm (VALENTIN e BRESSON, 1992). A formação da crosta pode reduzir a infiltração e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial, contribuindo para a erosão dos solos. Além disto, pode dificultar o crescimento de plantas pela restrição à emergência de plântulas e ao crescimento radicular, dificultando também as trocas gasosas entre a atmosfera do solo e atmosfera livre e as operações de cultivo.

O encrostamento, causado pelo impacto das gotas de água, é de ocorrência comum, particularmente em solos intensivamente cultivados. A superfície do solo apresenta-se compacta e, embora a espessura da camada de encrostamento possa ser relativamente pequena, seu efeito sobre as propriedades físicas do solo superficial influencia, acentuadamente, as condições de infiltração.

Como demonstrado por SILVA e KATO (1997), mesmo pequenas alterações da macroporosidade do solo proporcionam considerável redução da condutividade hidráulica. Isto explica a razão pela qual a crosta é tão efetiva na redução da taxa de infiltração. McINTYRE (1958a) verificou que a condutividade hidráulica do solo subjacente à crosta é cerca de 200 a 2000 vezes maior que a da crosta.

A seqüência de eventos envolvidos no processo de formação do encrostamento é apresentada em muitos trabalhos (DULEY, 1939; McINTYRE, 1958b; EVANS e BUOL, 1968; CHEN et al., 1980; NORTON, 1987; BRESSON e BOIFFIN, 1990; SLATTERY e BRYAN, 1992; VALENTIN e BRESSON, 1992) e, resumidamente, pode-se descrevê-la da seguinte forma: quebra dos agregados de solo pelo impacto das gotas de chuva; movimento das partículas finas e dispersas ao longo de poucos centímetros abaixo da superfície e sua deposição nos poros do solo; compactação da camada superficial do solo pelo impacto das gotas de água, produzindo uma camada delgada de solo expressivamente adensada; e deposição do material fino em suspensão, com a conseqüente orientação das partículas de argila. É importante lembrar que alguns destes eventos podem estar ausentes como, por exemplo, no caso das partículas de solo serem pouco susceptíveis à dispersão. Ainda assim, estes processos acarretam uma considerável redução da macroporosidade da camada superficial do solo.

A morfologia da crosta vai depender fundamentalmente dos fatores que levaram à sua formação. McINTYRE (1958a) concluiu que a crosta consiste de duas partes distintas: (a) a região de encrostamento superficial ou externo ("skin seal") que consiste de uma camada fina e compacta de aproximadamente 0,1 mm de espessura, aparentemente formada pela compactação devido ao impacto das gotas de chuva e (b) a região de encrostamento interno ou lavado ("washed-in"), de decréscimo da porosidade, devido à iluviação das partículas finas. Em solos com estrutura estável é possível que somente a região de encrostamento externo ("skin seal") seja responsável pelo decréscimo da permeabilidade e que a região de encrostamento interno ("washed-in") esteja ausente ou possa ser desprezada. Este fato foi comprovado por NORTON (1987) e SLATTERY e BRYAN (1992), utilizando técnicas de análise micromorfológica.

VALENTIN e BRESSON (1992), com o intuito de organizar o conhecimento do processo de encrostamento do solo e agrupar as crostas com base no seu aspecto morfológico e propriedades físicas, criaram um sistema de classificação de crostas superficiais para solos argilosos e arenosos. Segundo estes autores, os três principais tipos de crostas são: estruturais, deposicionais e erosionais. As crostas estruturais são formadas pelo rearranjo *in situ* das partículas e microagregados, resultantes do distúrbio estrutural provocado pelo

impacto das gotas de chuva. Neste caso, quatro tipos principais de crostas podem ser distinguidos morfológicamente e nomeados de acordo com o processo de formação dominante:

- Crostas frouxas (“slaking crusts”): consistem de uma fina camada bastante porosa com uma fraca interconexão entre os poros. Geralmente, nenhuma separação entre as partículas grosseiras (esqueleto) e as finas (plasma) pode ser observada, mesmo em solos sódicos. Em solos argilosos cultivados, tais crostas resultam principalmente da quebra de agregados provavelmente induzida pela compressão do ar aprisionado (NORTON, 1987) ou por microfissuras devido ao fenômeno de expansão e contração;
- Crostas de preenchimento (“infilling crusts”): exibem grãos de silte que obstruem os interstícios entre os agregados. Estes grãos são depositados a poucos milímetros de profundidade nos vazios entre os agregados, induzindo o decréscimo da taxa de infiltração e aumento da coesão. Tais crostas resultam da lenta erosão do topo dos agregados da superfície com subsequente iluviação das partículas de silte separadas;
- Crostas de coalescência (“coalescing crusts”): são geralmente espessas e a convexidade dos vazios aumenta na superfície. Resultam, principalmente, da gradual compactação devido a coalescência dos agregados pela deformação sob condições plásticas; tal processo é observado em solos úmidos sob condição de chuva com alta energia cinética (BRESSON e BOIFFIN, 1990); e
- Crostas de seleção (“sieving crusts”): são formadas por uma camada de textura grosseira sobrepondo uma camada plasmática. Esta diferenciação textural resulta da movimentação das partículas mais finas, havendo acúmulo destas a uma profundidade onde a porosidade foi reduzida devido à compactação provocada pelo impacto das gotas de chuva.

As crostas deposicionais estão relacionadas ao processo de sedimentação das partículas em microdepressões, cuja orientação das partículas grossas e finas depende das condições hidrodinâmicas do escoamento superficial. Neste caso, pode-se ter dois tipos principais de crosta (VALENTIN e BRESSON, 1992):

- Crostas de escoamento (“runoff depositional crusts”): são muito compactas e caracterizadas por camadas de microleitos. O escoamento superficial e a separação entre partículas finas e grossas induzem a um microacamamento submilimétrico alternado, que é mais ou menos contrastante em textura em relação às camadas adjacentes; e
- Crosta de sedimentação (“still depositional crusts”): consistem de partículas densamente compactadas e bem orientadas, sendo que o tamanho das mesmas aumenta gradualmente com a profundidade. Estas crostas se formam a partir do empoçamento da água. As partículas maiores sedimentam rapidamente formando a camada do fundo e as partículas mais finas depositam-se mais lentamente, formando a camada superior.

As crostas erosionais compreendem uma camada superficial rígida e lisa, constituída por partículas finas e resultam da erosão das crostas estruturais (CHEN et al., 1980).

A ocorrência de encrostamento no solo não depende somente das características do solo, como textura, estrutura ou presença de cobertura vegetal, mas também das características da chuva. Dentre estas, as mais utilizadas para caracterizar o encrostamento são a intensidade da chuva, o diâmetro médio e a velocidade final da gota. No entanto, a energia cinética das gotas tem-se tornado, nos últimos anos, a propriedade mais comumente utilizada, uma vez que associa todas as características anteriores. Experimentalmente, verifica-se que o aumento da energia cinética resulta em uma redução progressiva da condutividade hidráulica do solo (EDWARDS e LARSON, 1969; SILVA e KATO, 1997; AMORIM et al., 2001; SILVA et al., 2001).

2.3. Modelos de infiltração

Os modelos que descrevem a infiltração da água no solo podem ser teóricos ou empíricos. Os modelos empíricos têm a vantagem de permitir relacionar os parâmetros do modelo a características do solo, sem que estes obrigatoriamente tenham significado físico, e englobar na determinação de suas constantes alguns fatores que são de difícil consideração nos modelos teóricos como, por exemplo, a heterogeneidade do solo. A principal desvantagem do emprego de equações empíricas é que as equações

ajustadas somente são válidas para as condições em que elas foram determinadas, ou seja, não podem ser adotadas para outros tipos de solos. Dentre os modelos empíricos pode-se citar os de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton.

Já os modelos teóricos são baseados na teoria física do escoamento em meios porosos, que é descrito pela equação de Darcy ou pela equação de Richards.

2.3.1. Modelo de Green e Ampt

Dentre os modelos teóricos, aquele desenvolvido por Green e Ampt é um dos mais empregados. Esta equação é baseada na lei de Darcy e representada por:

$$T_i = K_s \left(1 + \frac{|\psi_f|}{L} \right) \quad (2.1)$$

em que:

T_i = taxa de infiltração, $L T^{-1}$;

K_s = condutividade hidráulica do solo saturado, $L T^{-1}$;

ψ_f = potencial matricial imediatamente abaixo da frente de umedecimento, L; e

L = profundidade da frente de umedecimento, L.

Observando a Equação 2.1 constata-se que a infiltração é governada pelos gradientes matricial ($|\psi_f|/L$) e gravitacional (L/L). Enquanto este último é constante, o outro decresce ao longo do tempo devido ao avanço da frente de umedecimento, ou seja, aumento do valor de L. Como resultado, a taxa de infiltração é alta no início do processo, particularmente quando o solo está inicialmente muito seco, e decresce com o tempo, aproximando-se de um valor constante, quando então o gradiente gravitacional transforma-se na principal força envolvida no processo (PREVEDELO, 1996).

Sabendo-se que uma das premissas assumidas por Green e Ampt é que o fluxo de água através do perfil solo é do tipo pistão, então pode-se considerar que

$$I = L(\theta_s - \theta_i) \quad (2.2)$$

Explicitando L na Equação 2.2 e substituindo em 2.1, encontra-se

$$T_i = K_s \left[1 + |\psi_f| \frac{(\theta_s - \theta_i)}{I} \right] \quad (2.3)$$

Apesar de ser um modelo bastante conveniente, uma vez que os parâmetros exigidos por ele são de obtenção razoavelmente fácil, as principais desvantagens deste modelo estão relacionadas com as pressuposições assumidas, tais como: existência de uma carga hidráulica H_0 constante na superfície do solo, perfil do solo homogêneo e com profundidade infinita. Estas condições nem sempre condizem com aquelas observadas na prática.

2.3.2. Modelo de Green e Ampt modificado por Mein e Larson

Como no desenvolvimento da equação de Green e Ampt é assumida a existência de uma lâmina de água na superfície, esta equação somente é válida para condições em que a superfície do solo encontra-se totalmente saturada no início do processo de infiltração. Sendo assim, MEIN e LARSON (1973) modificaram a equação de Green e Ampt para permitir a sua aplicação em condições anteriores ao empoçamento da água na superfície do solo e este novo modelo foi denominado Modelo de Green e Ampt modificado por Mein e Larson (GAML).

Desta forma, no momento do início do empoçamento da água na superfície do solo tem-se

$$I_p = \frac{|\psi_f|(\theta_s - \theta_i)}{\left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)} \quad (2.4)$$

em que:

I_p = lâmina infiltrada até o momento do empoçamento, L; e

i_p = intensidade de precipitação, $L T^{-1}$.

Embora MEIN e LARSON (1973) tenham utilizado condições diferentes na derivação do seu modelo, estes autores encontraram para condição após a saturação da superfície do solo equação idêntica à equação original proposta

por Green e Ampt (Equação 2.3), porém com a escala de tempo transladada para considerar a infiltração antes do empoçamento.

2.4. Modelos de infiltração para solos com encrostamento

Como já mencionado anteriormente, o encrostamento é caracterizado pela alta densidade, poros pequenos e condutividade hidráulica do solo saturado menor do que a da camada subjacente. A não consideração da formação da crosta nos modelos de infiltração pode conduzir a superestimativa da mesma.

Uma análise do efeito do desenvolvimento da crosta na infiltração foi desenvolvida por alguns autores. Dentre os quais pode-se citar os trabalhos de HILLEL e GARDNER (1969; 1970), EDWARDS e LARSON (1969), MOORE e LARSON (1980), MOORE (1981a; 1981b), BRAKENSIEK e RAWLS (1983) e CHAVES et al. (1993).

HILLEL e GARDNER (1969; 1970) usaram uma aproximação semi-analítica para calcular o fluxo para condições de infiltração constante e transiente em solos encrostados a partir do conhecimento das propriedades básicas da crosta e do solo subjacente. Estes autores desenvolveram modelos para condições em que a crosta já está bem estabelecida durante a infiltração.

Já EDWARDS e LARSON (1969) desenvolveram modelo numérico para a predição da infiltração, considerando a variação da condutividade hidráulica da crosta em função do tempo de exposição da superfície ao impacto da chuva.

MOORE e LARSON (1980) por sua vez sugeriram a utilização de uma função do decréscimo exponencial, semelhante à equação de infiltração de Horton, para representar as alterações na condutividade hidráulica da crosta ao longo do tempo, assim

$$K_c = K_{cf} + (K_{ci} - K_{cf})e^{-at} \quad (2.5)$$

em que:

K_c = condutividade hidráulica da crosta saturada, $L T^{-1}$;

K_{ci} = condutividade hidráulica inicial da crosta saturada, $L T^{-1}$;

K_{cf} = condutividade hidráulica final da crosta saturada, $L T^{-1}$;

a = parâmetro de ajuste, T^{-1} ; e

t = tempo de exposição à chuva, T .

MOORE (1981a) propõe que o parâmetro “a” da Equação 2.5 possa ser calculado em função da energia cinética da chuva que é determinada pela equação de Wischmeier e Smith. Assim,

$$a = S(0,02062 + 0,00873 \log i_p) \cdot i_p \quad (2.6)$$

em que:

S = fator relacionado a estabilidade do solo, $\text{cm}^2 \text{J}^{-1}$; e

i_p = intensidade de precipitação, cm h^{-1} .

Desta forma, o expoente “a” passa a ter um significado físico, estando relacionado a intensidade da chuva, propriedades do solo e práticas agrícolas.

BRAKENSIEK e RAWLS (1983), assim como MOORE (1981b), propuseram uma adaptação da equação de infiltração de GAML para solos agrícolas sujeitos ao encrostamento. Assim, os autores apresentam o modelo de GAML na seguinte forma:

$$T_i = \frac{K_e}{2} \left(1 + \frac{n|\psi_f|}{I} \right) \quad (2.7)$$

em que:

K_e = condutividade hidráulica equivalente, L T^{-1} ;

$n = \theta_e - \theta_i$ = déficit inicial de umidade do solo, $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$;

$\theta_e = \phi - \theta_r$ = porosidade efetiva do solo, $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$;

ϕ = porosidade total, $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$; e

θ_r = umidade residual do solo, $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$.

O valor de K_e é calculado por:

$$K_e = \frac{L}{\frac{L - z_c}{K_{sc}} + \frac{z_c}{K_c}} \quad (2.8)$$

em que:

K_c = condutividade hidráulica da crosta saturada, L T^{-1} ;

K_{sc} = condutividade hidráulica da sub-crosta saturada, L T^{-1} ; e

z_c = espessura da crosta, L.

BRAKENSIEK e RAWLS (1983) empregaram equação semelhante à encontrada por MOORE e LARSON (1980) (Equação 2.5) para o cálculo da condutividade hidráulica da crosta, sendo a variável independente tempo substituída pela energia cinética acumulada.

Não só modelos teóricos têm sido utilizados para modelar a infiltração na presença de encrostamento. CHAVES et al. (1993) propuseram modificações no modelo de Horton para atingir este objetivo. O modelo proposto tomou a seguinte forma:

$$T_i = T_{i_e} + (T_i - T_{i_e}) e^{[(a+bE_a+cE_a^2+dE_a^3)E_a]} \quad (2.9)$$

em que:

T_i = taxa de infiltração, cm h^{-1} ;

T_{i_e} = taxa de infiltração estável, cm h^{-1} ;

T_i = taxa de infiltração inicial, cm h^{-1} , e

a, b, c, d = coeficientes de ajuste obtidos por regressão polinomial, $\text{cm}^2 \text{J}^{-1}$, $\text{cm}^4 \text{J}^{-2}$, $\text{cm}^6 \text{J}^{-3}$, $\text{cm}^8 \text{J}^{-4}$, respectivamente.

CHAVES et al. (1993) propuseram que a energia cinética acumulada fosse calculada utilizando a equação de Wischmeier e Smith, que também foi utilizada por MOORE (1981a), e pode ser descrita como:

$$E_a = (0,02062 + 0,00873 \log i_p) \cdot i_p t \quad (2.10)$$

em que:

E_a = energia cinética acumulada, J cm^{-2} ;

i_p = intensidade de precipitação, cm h^{-1} ; e

t = tempo, h.

2.5. Métodos para determinação da infiltração

A determinação da infiltração de água no solo deve ser realizada por métodos simples e capazes de representar, adequadamente, as condições em que se encontra o solo. Para isto, torna-se necessário adotar métodos, cuja determinação da infiltração seja feita em condições semelhantes às aquelas que se deseja representar (BRANDÃO et al., 2003).

Os infiltrômetros são equipamentos utilizados para a determinação da taxa de infiltração da água no solo, sendo o simulador de chuvas e o infiltrômetro de anel os principais tipos utilizados em estudos hidrológicos.

Os simuladores de chuva são equipamentos nos quais a água é aplicada por aspersão com uma intensidade de aplicação superior à capacidade de infiltração do solo, exceto para um curto intervalo de tempo logo após o início da chuva. A área de aplicação de água é delimitada por placas metálicas, sendo a taxa de infiltração obtida pela diferença entre a intensidade da chuva simulada e a taxa de escoamento superficial resultante (BRANDÃO et al., 2003).

Os simuladores de chuva foram desenvolvidos para simular condições típicas de chuvas naturais. Desta forma, as principais características desejáveis para os simuladores de chuva são (MEYER, 1994):

- Distribuição do tamanho de gotas semelhante à da chuva natural, que apresenta uma variação de diâmetro de 0 a 7 mm, sendo que o diâmetro médio das gotas das chuvas erosivas está entre 1 e 3 mm;
- Velocidade de impacto da gota semelhante à da chuva natural, que varia, aproximadamente, de 0 a 9 m s⁻¹. Uma gota de 2 mm de diâmetro atinge uma velocidade final de 6 a 7 m s⁻¹;
- Intensidade de precipitação na faixa de interesse dos estudos hidrológicos, sendo geralmente os valores entre 12 e 120 mm h⁻¹ os de maior importância;
- Área de aplicação da chuva de tamanho suficiente para representar os tratamentos e condições a serem avaliadas. Parcelas de 1 m² ou menores são suficientes para estudar a erosão provocada pelo impacto da gota, mas parcelas muito maiores são necessárias para avaliar o transporte de solo por escoamento superficial;
- Características da gota e intensidade de aplicação razoavelmente uniforme sobre toda área de estudo;
- Aplicação contínua da chuva em toda área de estudo;
- Ângulo de impacto da gota não muito diferente do vertical para a maioria das gotas;
- Capacidade de repetibilidade da aplicação da chuva simulada;

- Manutenção satisfatória das características da chuva quando usada em condições comuns de campo, tais como altas temperaturas e ventos moderados;
- Portabilidade para movimentação de uma área de pesquisa para a outra; e
- Baixo custo de construção e operação.

PARR e BERTRAND (1960), MEYER (1994) e Neff, citado por RAWLS (1996), listam as vantagens e desvantagens dos simuladores de chuva. São as vantagens:

- Devido ao grau de controle que se pode exercer sobre a operação de simulação, o custo por dado obtido é muito pequeno quando comparado ao custo dos dados dos experimentos em condições de chuva natural;
- Os simuladores de chuva permitem um máximo controle sobre as condições da parcela no momento do teste e, ainda, intensidade e duração de chuva a ser aplicada. Desta forma, é possível a reprodução das condições caracterizadas como críticas para a ocorrência de encrostamento e perdas de água e solo;
- O grau de controle oferecido pelo simulador de chuvas oferece condições para efetuar repetições para uma dada condição experimental e coletar grande número de dados em tempo relativamente curto;
- A preparação das parcelas antes da aplicação da chuva simulada geralmente leva menos tempo do que a manutenção das parcelas para estudos que dependem da chuva natural. Frequentemente, apenas uma parte da área cujas características do solo e de manejo da cultura desejam ser avaliadas é suficiente para avaliação;
- Os pesquisadores podem fazer medições e observações durante a aplicação da chuva simulada, o que é difícil ou impossível durante a ocorrência de uma chuva natural; e
- Os simuladores de chuva são prontamente adaptáveis a ambientes de laboratório altamente controlados.

Já as desvantagens são:

- Os custos de aquisição, construção e manutenção dos simuladores de chuva são altos, e ainda, há necessidade de mão-de-obra para operá-lo;

- As áreas de teste podem variar de valores inferiores a 1 m² até muitas centenas de metros quadrados. No entanto, estas áreas podem não ser representativas;
- A maioria dos simuladores não reproduz a distribuição do tamanho das gotas da chuva natural, o que torna difícil a interpretação dos dados obtidos. Simuladores com formadores de gota do tipo tubo produzem gotas com estreita faixa de tamanhos e os tamanhos da gota podem ser ajustados somente mudando o diâmetro dos tubos. Simuladores com formadores de gotas do tipo bocal produzem gotas com ampla faixa de tamanhos, mas elas são muitas vezes menores que as gotas das chuvas naturais;
- Alguns simuladores não produzem gotas com velocidade terminal igual a velocidade da gota da chuva natural de mesmo tamanho. Velocidades menores, em combinação com a distribuição de gotas de tamanho pequeno, resultam em energia cinética menor do que a produzida pela chuva natural. A energia cinética das gotas de chuva simulada deve representar somente 40 a 50% da chuva natural; no entanto, estes valores de energia cinética tornam-se mais próximos quando os simuladores são dimensionados com bocais direcionados para baixo e com a água sendo aplicada sob pressão.

ALVES SOBRINHO (1997) verificou que a relação entre a energia cinética da chuva simulada produzida pelo bocal Veejet 80.100 e a energia cinética da chuva natural foi superior a 82% para intensidades menores ou iguais a 120 mm h⁻¹.

Um outro tipo de infiltrômetro é o de anel, que consiste de dois anéis que são enterrados verticalmente de forma concêntrica no solo, deixando uma borda livre de aproximadamente 15 cm. Durante a realização do teste é mantida uma lâmina de água dentro dos dois anéis, sendo feitas as leituras de infiltração no anel interno. O anel externo é utilizado para reduzir o efeito de dispersão lateral da água infiltrada no anel interno.

Geralmente, os resultados de taxa de infiltração ficam superestimados quando se utiliza o infiltrômetro de anel em relação àqueles obtidos com simulador de chuvas devido à formação do encrostamento nos solos sob chuva simulada. No infiltrômetro de anel não ocorre a formação do encrostamento porque não existe o impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do

solo. Outro fator que contribui para que as taxas de infiltração obtidas com o infiltrômetro de anel sejam maiores do que aquelas obtidas com o simulador de chuvas é que, no infiltrômetro de anel, existe uma lâmina de água sobre a superfície do solo, que proporciona um maior gradiente hidráulico para promover a infiltração. Assim, é importante que o método escolhido descreva adequadamente as condições reais de infiltração que se deseja simular.

BEN-HUR et al. (1987) avaliaram a taxa de infiltração em um solo Haploxeralf franco utilizando infiltrômetro de anel e simulador de chuva com intensidade de precipitação de 40 mm h^{-1} e energia cinética de $21 \text{ J mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e encontraram que a taxa de infiltração estável utilizando o infiltrômetro de anel foi de $57,8 \text{ mm h}^{-1}$, enquanto que para o simulador de chuva foi de $8,6 \text{ mm h}^{-1}$. Valores de taxa de infiltração estável mais elevados para infiltrômetro de anel também foram verificados por SIDIRAS e ROTH (1984) e PRUSKI et al. (1997).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição do experimento

Para a determinação da variação da taxa de infiltração da água no solo em decorrência da formação do encrostamento foi realizado experimento no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV utilizando o simulador de chuvas.

A unidade experimental constituiu de uma coluna de PVC de 250 mm de diâmetro preenchida com material de solo até a altura de 20 cm. Os tratamentos foram distribuídos em um esquema fatorial 5 x 6, sendo cinco classes de solo (Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Flúvico e Neossolo Quartzarênico) e seis níveis de energia cinética de impacto direto da gota de chuva sobre a superfície do solo (0, 525, 1051, 2102, 3153 e 4204 J m⁻²). O ensaio contou com três repetições, totalizando 90 unidades experimentais distribuídas conforme um delineamento inteiramente casualizado.

O material de solo Argissolo Vermelho – PV (0-22 cm) foi coletado na base da serra de São Geraldo, no município de São Geraldo, MG.

Os materiais de solo Argissolo Vermelho-Amarelo – PVA (0-18 cm) e Neossolo Flúvico – RUq (120-160 cm) foram coletados do lado esquerdo da estrada Viçosa - Juiz de Fora, a 3 km da primeira cidade onde fica localizado o aeroporto do município de Viçosa, MG.

O material de solo Latossolo Vermelho-Amarelo (0-22 cm) foi coletado nas imediações da localidade “Tiro de Guerra”, no município de Viçosa, MG.

O material de solo Neossolo Quartzarênico – RQo (0-10 cm) foi coletado nos lotes da EPAMIG do Projeto Jaíba, situado no município do Jaíba, norte de Minas Gerais.

Todos os materiais de solo foram secados ao ar e peneirados em malha com abertura de 2 mm.

A caracterização dos solos foi feita por meio de análises físicas e químicas. As análises físicas foram realizadas com base na metodologia proposta pelo Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da UFV e consistiram de análise textural (método da pipeta usando NaOH 0,1 mol L⁻¹ como agente dispersante) e argila dispersa em água (método da pipeta) (Quadro 3.1).

As análises químicas dos solos foram realizadas de acordo com DEFELIPO e RIBEIRO (1997) e consistiram na determinação do pH, fósforo (P), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺), acidez potencial (H + Al) e carbono orgânico (C.O.). Para as análises de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis foi utilizado o extrator KCl 1 mol L⁻¹. Para a extração e determinação da acidez total ou potencial (H + Al) foi empregado o acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, pH 7,00. O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley-Black (Quadro 3.2).

Quadro 3.1. Resultados das análises físicas dos solos estudados

Solo	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	A.D.A.	G.F.
	kg kg ⁻¹					%
RQo	0,675	0,201	0,026	0,098	0,072	25,83
RUq	0,206	0,311	0,177	0,307	0,011	96,50
PVA	0,232	0,163	0,132	0,473	0,364	23,02
PV	0,202	0,164	0,144	0,490	0,308	37,10
LVA	0,141	0,083	0,081	0,694	0,331	52,29

A.D.A. = argila dispersa em água.

G.F. = grau de floculação.

Quadro 3.2. Resultados das análises químicas dos solos estudados

Solo	pH	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	C.O.
		mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³				dag kg ⁻¹
RQo	5,53	43	1,05	0,37	0,00	1,5	0,447
RUq	5,57	8	0,09	0,34	0,00	1,6	0,481
PVA	5,41	46	1,45	0,56	0,24	5,1	1,746
PV	5,74	25	5,86	2,15	0,00	3,5	1,334
LVA	4,53	12	0,19	0,09	1,20	8,5	1,746

As colunas, construídas com tubo de PVC de 250 mm de diâmetro, tinham 25 cm de altura, sendo 2 cm correspondentes a borda inferior e 1 cm a borda superior. O fundo da coluna foi preenchido com 2 cm de areia (seca ao ar e peneirada em malha de 2 mm). Nas paredes internas da coluna foi colada areia, utilizando adesivo plástico para PVC, para evitar a ocorrência de caminhos preferenciais para a passagem da água entre a parede interna do tubo e o solo, durante a realização dos testes (Figura 3.1).

As colunas possuíam na parte superior uma fenda retangular de 2 cm de altura e 8 cm de comprimento que possibilitava o encaixe de uma calha metálica para coleta do escoamento superficial. No fundo da coluna foi feito um orifício e instalado um tubo de zinco de 1 cm de diâmetro e 4 cm de altura, para permitir a livre drenagem da água da coluna.



Figura 3.1. Coluna de PVC utilizada no experimento.

Na parte externa e superior da coluna foram presos, com rebite, quatro anéis de 2 cm de altura feitos com tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, que serviam de suporte para os funis que coletavam a chuva e possibilitavam a determinação da sua intensidade, conforme será explicado posteriormente.

As colunas foram preenchidas com solo, sem que houvesse compactação do mesmo, até a altura de 20 cm. O solo foi então umedecido por fluxo ascendente, empregando o princípio dos vasos comunicantes, para evitar qualquer alteração da superfície do solo. Para tal, um reservatório com altura de água superior à altura do solo dentro da coluna foi conectado a esta por meio de uma mangueira, o que permitiu que a água escoasse da base do reservatório para a base da coluna de solo. Quando a superfície do solo tornou-se úmida, desconectou-se a mangueira, cobriram-se as colunas com filme plástico para evitar a evaporação da água e permitiu-se que a água drenasse livremente da coluna. Após ter cessado a drenagem considerou-se que a umidade do solo correspondia à capacidade de campo.

3.2. Descrição do simulador de chuvas

Para aplicação da chuva foi utilizado simulador estacionário de bicos múltiplos e oscilantes construído na UFV conforme modelo proposto pelo National Soil Erosion Research Laboratory, vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (NSERL/USDA-ARS) (Figura 3.2). O simulador apresenta cinco bocais do tipo Veejet 80.100, espaçados de 110 cm, operando com pressão de serviço de 34,5 kPa. Estes bocais estavam presos a uma haste cujo ajuste permitia alterar a intensidade de aplicação da chuva. Para se obter maiores intensidades de aplicação o ajuste era feito de forma que os bocais ficassem menos tempo parados fora da abertura na calha do simulador, ou mais tempo quando se desejava obter intensidades menores. Desta forma, não era necessário alterar a pressão de serviço do bocal para modificar a intensidade de aplicação da chuva, o que garantia que o diâmetro das gotas de água se mantivesse constante e independente da mesma.

O fornecimento de água para o simulador de chuvas foi feito por um conjunto moto-bomba Schneider de 3/4 CV, que trabalhava afogado.

Para garantir uma melhor uniformidade de aplicação da chuva, durante a realização dos testes o simulador foi coberto com uma lona plástica para evitar a ação do vento.



Figura 3.2. Simulador de chuvas utilizado no experimento.

Estabeleceu-se que em todas as unidades experimentais seria aplicada a mesma energia cinética total (4204 J m^{-2}), sendo que o solo contido nas colunas ficaram expostos ao impacto direto das gotas de chuva até que fossem aplicadas as energia cinéticas de 0, 525, 1051, 2102, 3153, 4204 J m^{-2} . Uma vez atingidos estes valores, as colunas foram cobertas com uma manta sintética de alta permeabilidade (Bidim) com a finalidade de proteger o solo e cessar o desenvolvimento da crosta e, assim, permaneceram até que fosse aplicado o total de 4204 J m^{-2} .

Partindo do princípio que com a manutenção da pressão de serviço constante na entrada da linha dos bicos aspersores não haveria variação do diâmetro médio das gotas, pôde-se garantir que a energia cinética por unidade de lâmina de chuva era igualmente constante. Conforme procedimento descrito por AMORIM (2000) determinou-se que a energia cinética por unidade de lâmina de chuva foi da ordem de $27 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$. Desta forma, por motivos de praticidade, em todas as unidades experimentais foi aplicado um total de 156 mm de lâmina de chuva, correspondente a energia cinética de 4204 J m^{-2} . As lâminas de chuva correspondentes as energias cinéticas de impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo de 0, 525, 1051, 2102, 3153, 4204 J m^{-2} foram de 0, 19, 39, 78, 117 e 156 mm, respectivamente.

Durante a realização do experimento, as intensidades de aplicação de chuva simulada variaram entre 130,0 e 158,8 mm h^{-1} de um teste para outro. Quando a coluna foi mantida coberta com o Bidim durante todo tempo de duração do teste (energia cinética de impacto direto da chuva igual a 0 J m^{-2}), a capacidade de infiltração da água no solo foi freqüentemente superior a intensidade de aplicação de chuva. Nestes casos, ajustou-se o simulador de chuvas para que fossem aplicadas intensidades de aplicação altas o suficiente para gerar o escoamento superficial. Isto ocorreu em quase todos os solos (exceto no Argissolo Vermelho Amarelo), sendo necessário utilizar intensidades de aplicação de 228,0 mm h^{-1} no Latossolo Vermelho Amarelo até 563,2 mm h^{-1} no Neossolo Quartzarênico.

3.3. Determinação da taxa de infiltração

Para fins de determinação da taxa de infiltração da água na coluna de solo, foi coletado o escoamento superficial por meio de uma calha metálica, conectada à fenda feita na parte superior da coluna, e de uma mangueira de 1",

que conduzia o escoamento para um reservatório. Dependendo do volume de escoamento superficial gerado durante o teste, era utilizado um reservatório construído com tubo de PVC de 100 mm ou 125 mm de diâmetro, ambos com altura de 600 mm (Figura 3.3). Neste reservatório foi instalado um equipamento denominado Thalimedes (Figura 3.4), que permitia a medição da altura do nível da água em intervalos de um minuto.

Os funis presos às colunas de solo (Figura 3.3) permitiram a coleta da chuva, que foi armazenada em um outro reservatório no qual foi instalado linígrafo (Figura 3.5), desenvolvido conforme metodologia proposta por BARBIERI (1993), para possibilitar o registro contínuo da lâmina de chuva aplicada ao longo do tempo. Conhecendo-se a intensidade de aplicação da chuva e a taxa de escoamento superficial foi possível obter, por diferença, a taxa de infiltração da água no solo.

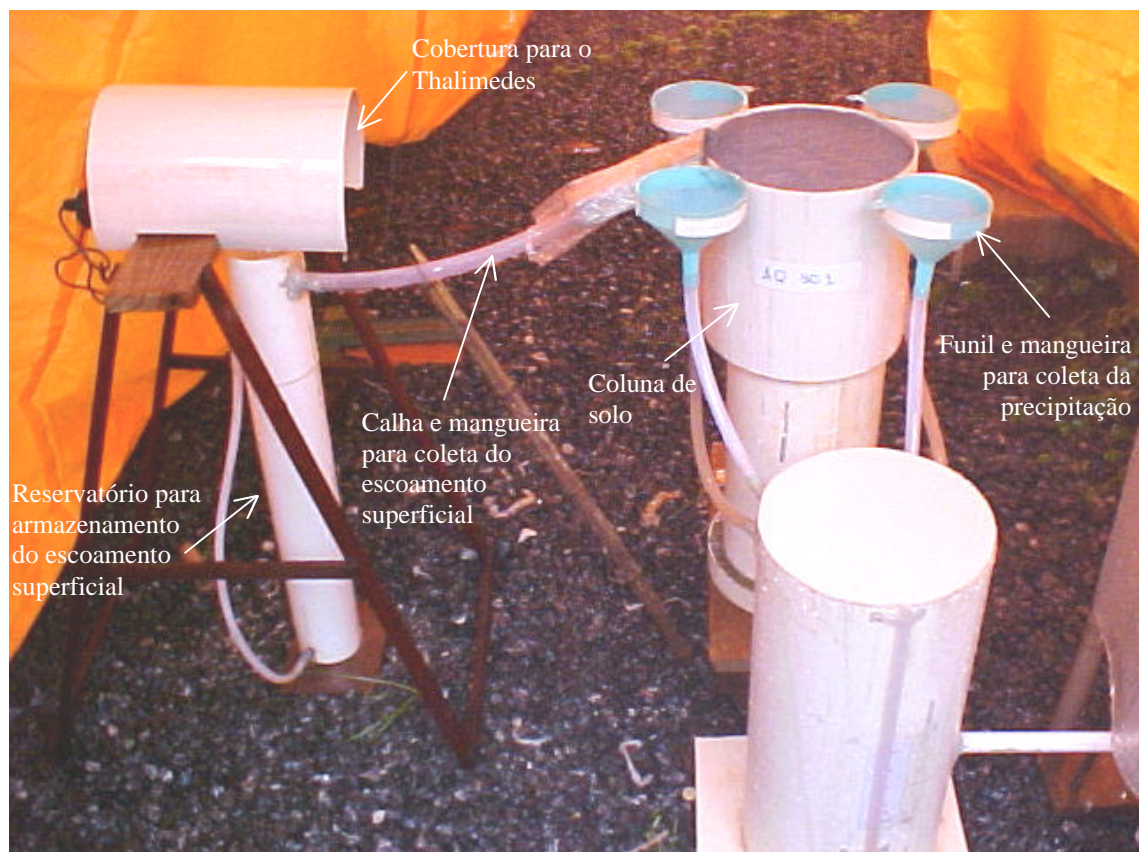


Figura 3.3. Estrutura construída para realização do experimento.



Figura 3.4. Medidor de nível (Thalimedes) utilizado no experimento.



Figura 3.5. Reservatório de armazenamento da precipitação e linígrafo utilizados na realização do experimento.

Na parede externa do reservatório de acúmulo da água precipitada havia uma escala e uma mangueira transparente que permitia visualizar a lâmina de água dentro do mesmo e determinar o momento de cobrir o solo com o Bidim e também do fim de teste. Isto se fez necessário devido à variação da intensidade de chuva inerente ao simulador de chuvas de um teste para outro, que não permitia garantir que a lâmina de água desejada tivesse sido aplicada no momento de cobrir o solo e no fim do teste com base no tempo de exposição da chuva.

3.4. Determinação das perdas de solo

As perdas de solo foram determinadas por meio da coleta do solo transportado por arrastamento para o reservatório de armazenamento do escoamento superficial. A água armazenada foi homogeneizada e, então, foi retirada uma amostra de 250 mL em uma saída localizada no fundo da caixa. Este volume foi levado à estufa, a 100 °C, até que toda água evaporasse, determinando-se, então, o peso do solo perdido correspondente ao volume de 250 mL de escoamento superficial. Conhecendo-se o volume total de escoamento superficial, obtido com base nas leituras do Thalimedes e na área do reservatório de armazenamento, foi possível determinar o peso total de solo perdido por teste.

3.5. Análises físicas do solo após a aplicação da chuva simulada

Para a avaliação do desenvolvimento da crosta foram enterrados verticalmente nas colunas de solo três cilindros de metal de aproximadamente 58 mm de diâmetro e 50 mm de altura (Figura 3.6), sendo um deles destinado à análise micromorfológica, outro para análise da porosidade e microporosidade e o último reservado para substituição em eventuais perdas. Ao final da aplicação da chuva simulada, os anéis foram removidos, embalados em filme plástico e colocados em caixa de papel para posterior realização da análise micromorfológica e determinação da macroporosidade e espessura da crosta.

3.5.1. Análise da porosidade total, macro e microporosidade

Um dos anéis removidos após a realização dos testes foi utilizado para a determinação da porosidade total e microporosidade do solo. Para isto, o solo

contido nos anéis foi saturado em bandejas, com nível de água mantido próximo à borda superior do anel.

Para que não houvesse perda de solo, na parte inferior do anel foi colocado um pedaço de tecido (organza) preso com elástico. Os anéis foram mantidos nas bandejas por 24h e, então, levados à mesa de tensão, onde foram submetidos à tensão de 0,6 m.c.a. Após 48h na mesa de tensão, os anéis foram pesados e levados para estufa de circulação forçada a 100 °C por no mínimo 24h até que o solo estivesse totalmente seco, sendo novamente pesados.



Figura 3.6. Anéis metálicos enterrados na superfície do solo antes da exposição à chuva simulada.

Depois de descartado o solo, foram pesados o anel, o tecido e o elástico e também determinados a altura e o diâmetro dos anéis. Desta forma, foi possível calcular a microporosidade e a porosidade total de acordo com as equações:

$$\phi_{\text{micro}} = \frac{P_u - P_s}{P_s - P_a} 100 \quad (3.1)$$

em que:

$$\phi_{\text{micro}} = \text{microporosidade, \%};$$

Pu = peso do solo úmido, g;

Ps = peso do solo seco, g; e

Pa = peso do anel, tecido e elástico, g.

$$\phi = \left(1 - \frac{d_s}{d_p} \right) 100 \quad (3.2)$$

em que

ϕ = porosidade total, %;

$d_s = \frac{Ps - Pa}{Vol}$ = massa específica do solo, g cm⁻³;

Vol = volume do anel, cm³; e

d_p = massa específica das partículas, g cm⁻³.

A massa específica das partículas foi determinada usando o método do balão volumétrico usando como agente penetrante o álcool etílico (EMBRAPA, 1997).

A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.5.2. Análise micromorfológica

A análise micromorfológica foi realizada segundo princípios descritos por MURPHY (1986), modificados por SCHAEFER (1994). A técnica consiste na impregnação de amostras indeformadas de solo com resina de poliéster, de forma a ocupar todo espaço poroso existente. A resina polimerizada torna o solo rígido o suficiente para que possa ser cortado e polido, sem que haja deformação da estrutura. Assim, as microfotografias obtidas das lâminas confeccionadas com este material permitem avaliar algumas características micromorfológicas do solo, tais como macroporosidade, distribuição dos poros e sua continuidade.

As amostras de solo contidas nos anéis metálicos foram secas em estufa a 45°C, por dois dias para favorecer a penetração da resina. Posteriormente, os anéis contendo as amostras de solo foram embalados em sacos plásticos deixando a parte superior da amostra exposta para que se pudesse proceder a impregnação com a resina.

Para o preparo de 1 L da mistura utilizada na impregnação das amostras foram utilizados 700 mL de resina de poliéster (REVOPAL T208), 300 mL de monômero de estireno, 15 gotas de catalisador e corante azul.

A mistura foi acrescentada lentamente às amostras de forma que não houvesse destruição do encrostamento e para que todo ar fosse expulso da amostra.

A polimerização foi feita em ambiente ventilado até que o bloco se tornasse rígido. Uma fatia delgada, com aproximadamente 5 mm de espessura, foi cortada longitudinalmente, sendo o corte feito no centro do bloco.

Como o objetivo deste trabalho era a avaliação das características do encrostamento superficial foi selecionada somente a parte superior dos blocos para confecção das lâminas de vidro. Para tal, uma fatia delgada de solo teve uma das faces colada com araldite na lâmina de vidro e a outra face desbastada utilizando um polidor com pó de diamante até atingir 30 micrômetros. Esta etapa do trabalho foi realizada no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais (CDTN/UFMG).

As lâminas foram levadas para o microscópio OLYMPUS AX70 que, por meio de câmera de vídeo ligada a um microcomputador, permite a obtenção de imagens usando o programa computacional PHOTOSHOP 6.0. Como não foi possível obter uma imagem que abrangesse toda a lâmina com resolução suficiente para avaliar as características da crosta em programas computacionais, foram capturadas várias imagens sucessivas ao longo do microperfil do solo contido na lâmina. Desta forma, de cada lâmina foram selecionadas três faixas verticais, contendo 10 imagens que apresentavam alguma área de sobreposição com a imagem superior e a inferior a ela, conforme apresentado na Figura 3.7.

De cada um dos 30 pontos, cujas imagens foram capturadas, gerava-se uma imagem com luz direta e duas com luz polarizada. O objetivo das imagens com luz polarizada era destacar os grãos de quartzo, que nas imagens com luz direta se confundem com a cor dos poros.

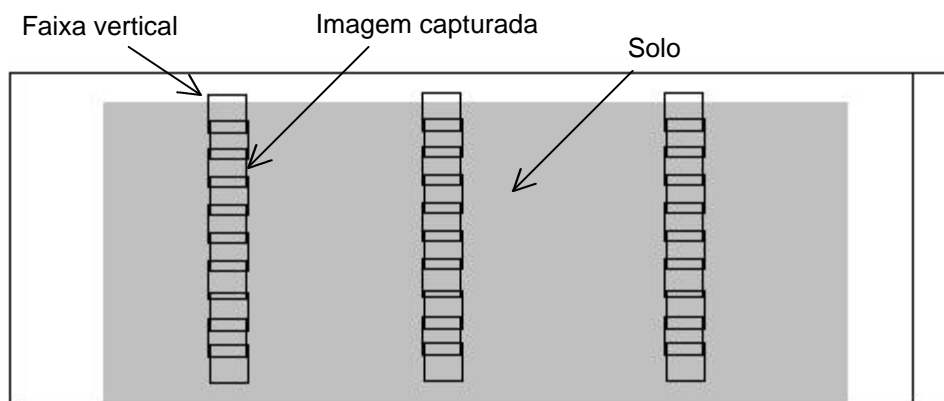


Figura 3.7. Esquema das três faixas verticais com os pontos de obtenção das imagens nas lâminas de solo.

As imagens foram manipuladas usando programa computacional para micromorfometria Quantiporo versão 1.0 (FERNANDES FILHO e VIANA, 2001), para a determinação da macroporosidade do solo ao longo da profundidade do mesmo.

Usando o programa computacional Visual Stitcher Beta foi possível unir as imagens pertencentes a uma mesma faixa vertical. A partir da imagem resultante determinou-se a espessura da crosta superficial.

3.6. Determinação da condutividade e resistência hidráulica da crosta

BRAKENSIEK e RAWLS (1983) desenvolveram modelo para descrever o processo de infiltração em solos com encrostamento superficial baseado na equação de Green e Ampt. Estes autores sugerem a subdivisão do perfil do solo em duas camadas (crosta e subcrosta) e determinam então um valor de condutividade hidráulica equivalente (K_e) que associa a condutividade das duas camadas através de média harmônica (Equação 2.8).

Neste trabalho foi utilizada uma modificação no modelo de BRAKENSIEK e RAWLS (1983), no que se refere à determinação do parâmetro K_e . Sabendo-se que os valores de taxa de infiltração estável do solo (T_{ie}) aproximam-se dos valores de condutividade hidráulica equivalente, estabeleceu-se uma relação de igualdade entre estes parâmetros, conforme sugerido por SILVA e KATO (1998).

Uma vez determinadas a espessura da crosta (z_c) e a altura da coluna de solo (L) e considerando que a condutividade hidráulica da subcrosta é a taxa de infiltração estável da coluna que não sofreu exposição direta à chuva

simulada, é possível calcular a partir da Equação (2.8) a condutividade hidráulica da crosta (K_c) e, também, a resistência hidráulica da crosta (R_c) pela relação:

$$R_c = \frac{Z_c}{K_c} \quad (3.3)$$

3.7. Análises estatísticas

Os valores médios de taxa de infiltração estável, perda de solo, porosidade total, macro e microporosidade para cada classe de solo foram comparados por meio de teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de significância, uma vez verificada a homocedasticidade destas variáveis pelo teste de Cochran.

Foram realizadas análises de regressão, utilizando-se o programa estatístico STATISTICA 6.0, com o objetivo de determinar equações ajustadas aos dados obtidos para cada solo, tendo como variáveis dependentes a taxa de infiltração, a perda de solo, as características de porosidade da superfície do solo (porosidade total, macroporosidade e microporosidade) e as características da crosta (espessura, condutividade hidráulica e resistência hidráulica) e como variável independente a energia cinética da chuva.

Considerando as características químicas e físicas de cada solo, determinaram-se equações que estabelecem a relação entre a variável dependente resistência hidráulica da crosta e as variáveis independentes teor de areia grossa, areia fina, silte, argila total e argila dispersa em água, grau de floculação, teor de carbono orgânico, macroporosidade da camada de 0-5 cm e energia cinética da chuva.

Desta forma, a partir das equações ajustadas e do conhecimento de algumas características do solo e da chuva é possível estimar a resistência hidráulica da crosta desenvolvida pelo impacto direto da gota e, a partir desta, a taxa de infiltração em solos sujeitos a encrostamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Taxa de infiltração

Os valores de taxa de infiltração encontrados para os diferentes níveis de energia cinética e classes de solo são apresentados no Quadro 4.1. No Apêndice A são apresentados os quadros de análise de variância (Quadros 1A e 2A).

Na Figura 4.1 são apresentados o gráfico e as equações ajustadas relacionando a taxa de infiltração e a energia cinética da chuva para cada classe de solo analisada.

Quadro 4.1. Taxa de infiltração estável considerando a energia cinética aplicada e a classe de solo

Ec	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
J m ⁻²	mm h ⁻¹				
0	442,9	114,7	85,2	166,2	260,7
525	147,3	60,4	40,0	52,6	105,6
1051	92,5	61,8	26,2	31,7	70,3
2102	80,0	51,8	26,0	26,1	72,7
3153	74,5	56,8	22,4	30,1	72,0
4204	89,3	60,4	28,2	49,1	92,2
Média ¹	154,4A	67,6a	38,0c	59,3b	112,3B

¹ Letras maiúsculas ou minúsculas indicam homogeneidade de variância entre os solos. Letras diferentes entre solos que apresentam homogeneidade de variância indicam diferenças significativas pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de significância.

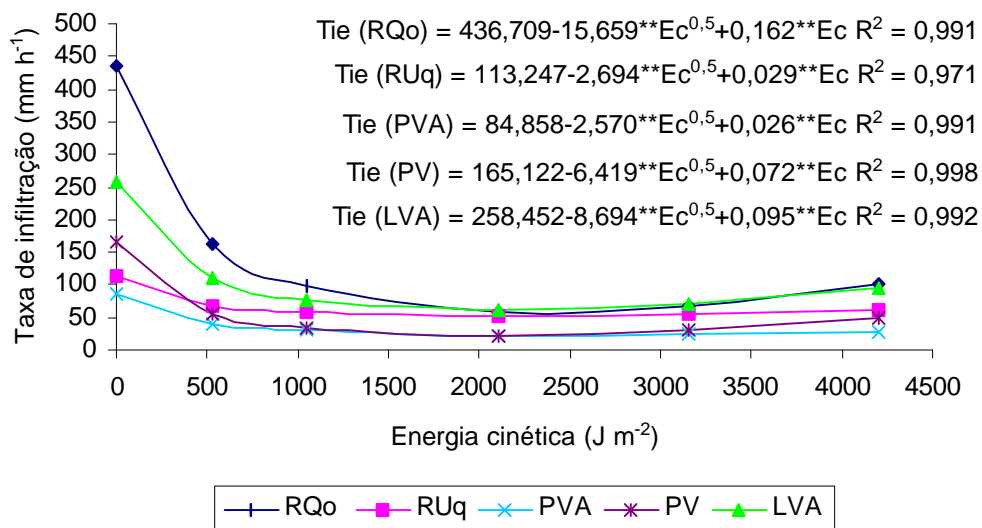


Figura 4.1. Taxa de infiltração estável (Tie) considerando a energia cinética aplicada (Ec) e a classe de solo.
 **: significativo a 1% pelo teste t.

Os maiores valores de taxa de infiltração foram aqueles observados para o Neossolo Quartzarênico e o Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo os valores encontrados para o primeiro significativamente superiores aos encontrados para o segundo. O RQo, por possuir textura grossa (0,875 kg kg⁻¹ de areia), apresenta alta macroporosidade, o que favoreceu a infiltração da água no solo.

Os elevados valores de taxa de infiltração obtidos para o Latossolo Vermelho-Amarelo são consequência da sua estrutura granular muito pequena, favorecida pelos altos teores de óxidos de Fe e Al e matéria orgânica presentes nesta classe de solo.

O solo que apresentou menor taxa de infiltração foi o Argissolo Vermelho-Amarelo, provavelmente decorrente do baixo grau de estruturação, que, associado ao elevado conteúdo de argila dispersa em água (Quadro 3.1), favoreceu o preenchimento dos poros pela argila.

O Argissolo Vermelho, apesar de ter constituição semelhante à do Argissolo Vermelho-Amarelo, apresentou taxa de infiltração significativamente superior à daquele solo. Isto provavelmente decorre do fato deste solo apresentar maiores teores de óxidos de Fe do que o PVA. Estes óxidos ao se ligarem às lâminas de caulinita promovem uma desorganização destas lâminas, o que favoreceu a infiltração da água. Possivelmente, no PVA estas apresentam-se predominantemente orientadas face-a-face, o que dificultou a passagem da água para dentro do perfil do solo.

Pode-se observar na Figura 4.1 que, para todas as classes de solo, houve uma redução da taxa de infiltração quando foram aplicados valores crescentes de energia cinética da chuva, o que é uma evidência do desenvolvimento da crosta.

Os solos que foram mais afetados pelo encrostamento, ou seja, aqueles que sofreram maior decréscimo de taxa de infiltração por unidade de E_c foram o RQo e LVA (162 e 95 mm $m^2 \text{ kJ}^{-1} \text{ h}^{-1}$) embora tenham mantido as maiores taxas de infiltração.

É possível observar na Figura 4.1 que os valores de taxa de infiltração atingem um valor mínimo para valores de energia cinética aplicada na faixa entre 2000 a 2400 $J \text{ m}^{-2}$ e, posteriormente, ocorre um ligeiro aumento, que foi mais evidente para o maior valor de energia cinética aplicada (4204 $J \text{ m}^{-2}$). Este ligeiro aumento pode ser explicado pelo desgaste da crosta provocado pelo desprendimento e arraste das partículas de solo pelo escoamento superficial.

Os valores de energia cinética que resultaram em um mínimo valor de taxa de infiltração, consequência do máximo encrostamento, foram 2342 $J \text{ m}^{-2}$ para o RQo, 2093 $J \text{ m}^{-2}$ para o RUq; 2394 $J \text{ m}^{-2}$ para o PVA, 2004 $J \text{ m}^{-2}$ para o PV e 2070 $J \text{ m}^{-2}$ para o LVA. Estes valores, obtidos a partir das equações apresentadas na Figura 4.1, mostram que o solo em que mais rapidamente a taxa de infiltração tornou-se mínima foi o Argissolo Vermelho.

4.2. Perdas de solo

No Quadro 4.2. são apresentados os valores de perda de solo para os diferentes níveis de energia cinética aplicada e classes de solo e, no Apêndice A, o quadro de análise de variância (Quadro 3A).

Na Figura 4.2 são apresentados os gráficos de perda de solo em função da energia cinética aplicada e as equações ajustadas para as diferentes classes de solo.

Para que ocorra perda de solo, a tensão cisalhante provocado pelo escoamento superficial deve ser superior a tensão crítica de cisalhamento do solo. A tensão cisalhante do escoamento superficial (τ) é dada por:

$$\tau = \gamma y S_0 \quad (4.1)$$

em que:

$$\gamma = \text{peso específico da água, } M \text{ T}^{-2} \text{ L}^{-2};$$

y = lâmina de escoamento superficial, L; e
 S_0 = declividade da superfície do solo, L L⁻¹.

Já a tensão crítica para o cisalhamento do solo (τ_c), força a partir da qual inicia-se a erosão, dependente das características do solo como a granulometria, constituição mineralógica e química do solo, estrutura e capacidade infiltração.

Quadro 4.2. Perdas do solo considerando a energia cinética aplicada e a classe de solo

Ec	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
J m ⁻²	ton ha ⁻¹				
0	0,7	2,7	0,3	0,6	2,3
525	0,1	16,9	6,9	3,2	2,0
1051	4,3	19,8	20,0	21,7	10,2
2102	14,5	41,9	29,8	29,1	20,2
3153	11,2	53,7	51,6	54,3	13,9
4204	21,2	80,9	55,1	42,5	32,3
Média ¹	8,7C	36,0A	27,3B	25,3B	13,5C

¹ Letras diferentes entre solos que apresentam homogeneidade de variância indicam diferenças significativas pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de significância.

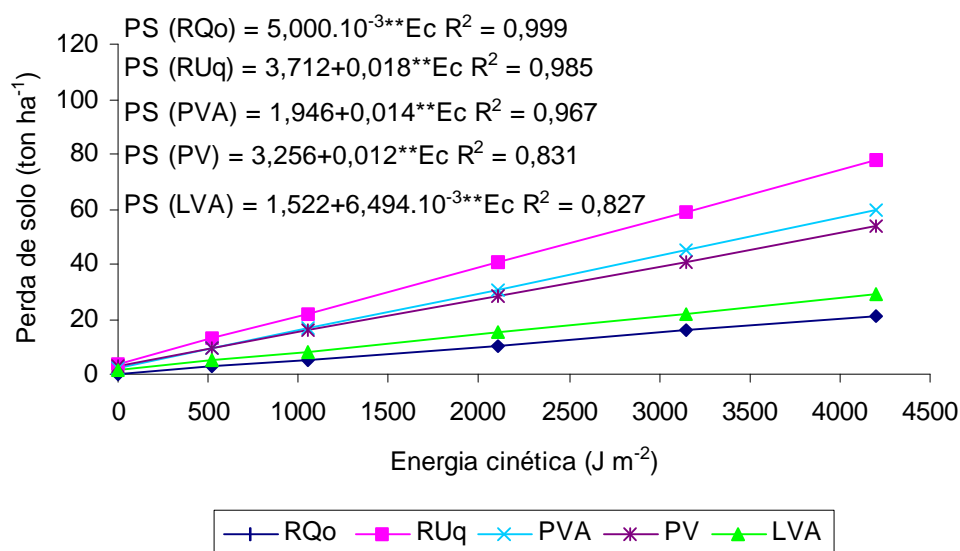


Figura 4.2. Perda de solo (Ps) considerando a energia cinética aplicada (Ec) e a classe de solo.

** : significativo a 1% pelo teste t.

A perda de solo no Neossolo Flúvico foi significativamente superior à obtida para os demais solos, sendo os valores encontrados para os Argissolos igualmente superiores aos encontrados para o Neossolo Quartzarênico e o Latossolo Vermelho-Amarelo. O Neossolo Flúvico também foi o solo em que a taxa de perda de solo por unidade de E_c (coeficiente angular da equação linear) foi maior. Este solo, por sua idade jovem, é o que possui menor desenvolvimento de estrutura, o que lhe conferiu um menor τ_c e menor resistência à erosão hídrica

Os resultados evidenciam que o aumento da energia cinética provocou aumento progressivo da perda de solo. A redução da taxa de infiltração provocada pelo desenvolvimento da crosta fez com que houvesse um aumento da velocidade e da lâmina de escoamento superficial e, conseqüentemente, uma maior tensão de cisalhamento do mesmo, o que aumentou a sua capacidade de arraste das partículas de solo.

Pode-se observar também que elevados valores de perda de solo foram encontrados para os solos que apresentaram menores taxas de infiltração (Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Vermelho) e, em função disto, menor tensão cisalhante do escoamento superficial. Desta forma, as partículas resultantes da quebra dos agregados da superfície pelo impacto das gotas de chuva foram carregadas pelo escoamento superficial.

O Neossolo Quartzarênico e o Latossolo Vermelho-Amarelo apresentaram perda de solo significativamente inferior à dos demais solos, uma vez que suas características lhes conferiam um maior τ_c . No Neossolo Quartzarênico, além das partículas constituintes (areia) serem mais pesadas, a tensão cisalhante do escoamento superficial foi baixa não sendo capaz de carrear grande quantidade destas partículas. O mesmo pode ser dito para o Latossolo Vermelho-Amarelo, que por apresentar agregados mais estáveis, o impacto das gotas de chuva não foi suficiente para desagregá-los totalmente, nem houve tensão cisalhante do escoamento superficial significativa para carregá-los.

4.3. Porosidade total, macro e microporosidade

No Quadro 4.3 são apresentados os valores de porosidade total, macro e microporosidade obtidos para cada nível de energia cinética aplicada e

classe de solo e no Apêndice A, os quadros de análise de variância (Quadros 4A a 9A).

Quadro 4.3. Valores de porosidade total, macro e microporosidade considerando a energia cinética aplicada e a classe de solo

Ec	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
J m ⁻²	Porosidade total (m³ m⁻³)				
0	0,435	0,681	0,636	0,646	0,677
525	0,449	0,664	0,637	0,639	0,666
1051	0,436	0,682	0,636	0,629	0,672
2102	0,444	0,682	0,624	0,622	0,691
3153	0,440	0,676	0,633	0,635	0,674
4204	0,446	0,681	0,646	0,643	0,668
Média ¹	0,442C	0,678A	0,635B	0,636B	0,675A
	Macroporosidade (m³ m⁻³)				
0	0,312	0,272	0,209	0,289	0,229
525	0,338	0,249	0,236	0,298	0,213
1051	0,322	0,262	0,212	0,268	0,198
2102	0,335	0,264	0,188	0,255	0,244
3153	0,326	0,259	0,211	0,271	0,225
4204	0,342	0,267	0,217	0,291	0,219
Média ¹	0,329 ^A	0,262C	0,212a	0,279B	0,221a
	Microporosidade (m³ m⁻³)				
0	0,123	0,410	0,427	0,357	0,449
525	0,111	0,414	0,401	0,341	0,453
1051	0,115	0,420	0,424	0,361	0,474
2102	0,109	0,418	0,436	0,367	0,447
3153	0,114	0,417	0,422	0,365	0,449
4204	0,104	0,414	0,429	0,353	0,449
Média ¹	0,113 ^A	0,416a	0,423	0,357B	0,453b

¹ Letras maiúsculas ou minúsculas indicam homogeneidade de variância entre os solos. Letras diferentes entre solos que apresentam homogeneidade de variância indicam diferenças significativas pelo teste de agrupamento de Scott-Knott a 5% de significância.

Como a porosidade total, a macro e a microporosidade não variaram significativamente com o aumento da energia cinética aplicada não foi possível ajustar equações de regressão, sendo aplicado o teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade para avaliar as diferenças entre as classes de solo que apresentavam homogeneidade de variância.

A ausência de dependência entre estes parâmetros e a energia cinética aplicada se deve ao fato de que a energia cinética do impacto da gota de chuva afeta a camada mais superficial do solo, enquanto que a determinação da porosidade total, macro e microporosidade é feita em anéis de 5 cm de altura, o que faz com que o efeito do encrostamento nestes parâmetros fique diluído e torne este método inadequado para avaliação do encrostamento.

O Neossolo Flúvico e o Latossolo Vermelho-Amarelo apresentaram porosidade total significativamente superior aos demais solos, enquanto o Neossolo Quartzarênico foi aquele que apresentou o menor valor. Fica evidente, neste caso, que a porosidade total não é um parâmetro adequado para avaliar a capacidade de movimentação da água no perfil do solo, uma vez que o solo que apresentou menor porosidade total foi aquele que apresentou maior taxa de infiltração.

O valor de macroporosidade do Neossolo Quartzarênico foi significativamente maior que do Argissolo Vermelho e do Neossolo Flúvico, o que explica a maior taxa de infiltração observada naquele solo. Os valores de macroporosidade do Argissolo Vermelho-Amarelo e do Latossolo Vermelho-Amarelo não diferiram estatisticamente.

Como a análise de homogeneidade de variância separou a microporosidade em três grupos de solo, não foi possível fazer considerações a respeito deste parâmetro para os solos estudados.

No Apêndice B são apresentados os valores de macroporosidade média determinados a partir da manipulação das imagens obtidas no microscópio com a utilização do programa computacional Quantiporo. Vale ressaltar que nem sempre estas determinações de macroporosidade foram coerentes com os resultados esperados para este tipo de análise. Deve considerar-se, no entanto, que o tamanho das imagens (3 x 3 mm) a partir das quais foi determinado este parâmetro fazia com que a presença de poros planares ou concreções gerasse valores muito altos ou muito baixos de macroporosidade, respectivamente.

4.4. Espessura da crosta

Nas Figuras 4.3 a 4.7 são apresentadas algumas das imagens do microperfil utilizadas para a determinação da espessura da crosta decorrente da aplicação de energias cinéticas crescentes, para cada classe de solo.

Pôde-se observar o encrostamento em todos os solos. Nas fotomicrografias dos solos que foram mantidos cobertos durante todo o teste (0 J m^{-2}), observa-se a presença de poros largos e interligados ao redor dos grãos simples (RQo) e, ou, dos agregados, o que determinou condições favoráveis a infiltração.

Uma parte das fotomicrografias mostra o desenvolvimento de crostas estruturais [Figuras 4.3(b) e (c); 4.4(b) e (c); 4.5(b); 4.6(b) e (c); 4.7(b)], formadas pelo rearranjo das partículas e microagregados resultantes do distúrbio estrutural provocado pelo impacto das gotas de chuva. Este tipo de crosta apareceu principalmente quando foram aplicados menores níveis de energia cinética. No entanto, crostas erosionais apareceram quando da aplicação dos maiores níveis de energia cinética [Figuras 4.3(d) e (e); 4.4(d) e (e); 4.5(c), (d) e (e); 4.6(d) e (e); 4.7(c), (d) e (e)].

No Neossolo Quartzarênico (Figura 4.3) foi possível observar uma maior concentração de grãos de areia fina na superfície do solo e iluviação de partículas finas a poucos milímetros abaixo da superfície do solo.

Nas fotomicrografias obtidas para o Neossolo Flúvico (Figura 4.4), observou-se a quebra dos agregados da superfície e iluviação das partículas resultantes no microperfil, havendo o preenchimento dos vazios e, conseqüentemente, acentuada redução da macroporosidade. Além disto, evidenciou-se um expressivo surgimento de poros planares. Estes poros que surgem paralelos à superfície são pouco interconectados e exercem pouca influência na condutividade hidráulica do solo.

Nos solos PVA e PV (Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente), evidenciou-se principalmente um forte empacotamento dos agregados localizados na superfície, que fizeram com que os vazios antes largos e comunicantes se tornassem descontínuos, sendo observadas numerosas microfissuras não comunicantes.

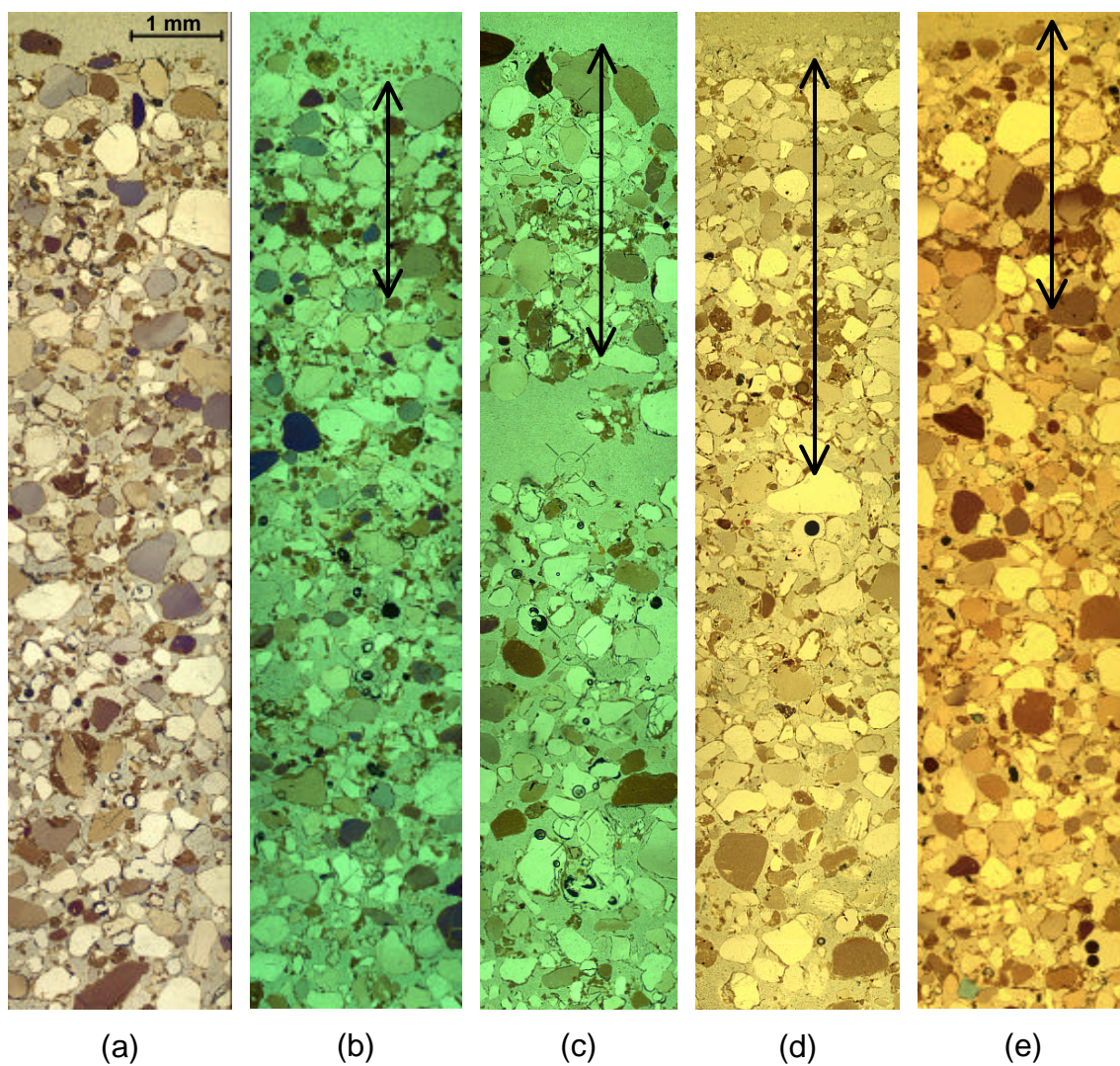


Figura 4.3. Fotomicrografias da superfície do Neossolo Quartzarênico submetido a energias cinéticas crescentes: 0 (a); 525 (b); 1051 (c); 3153 (d); e 4204 J m^{-2} (e). As setas indicam a extensão da crosta.

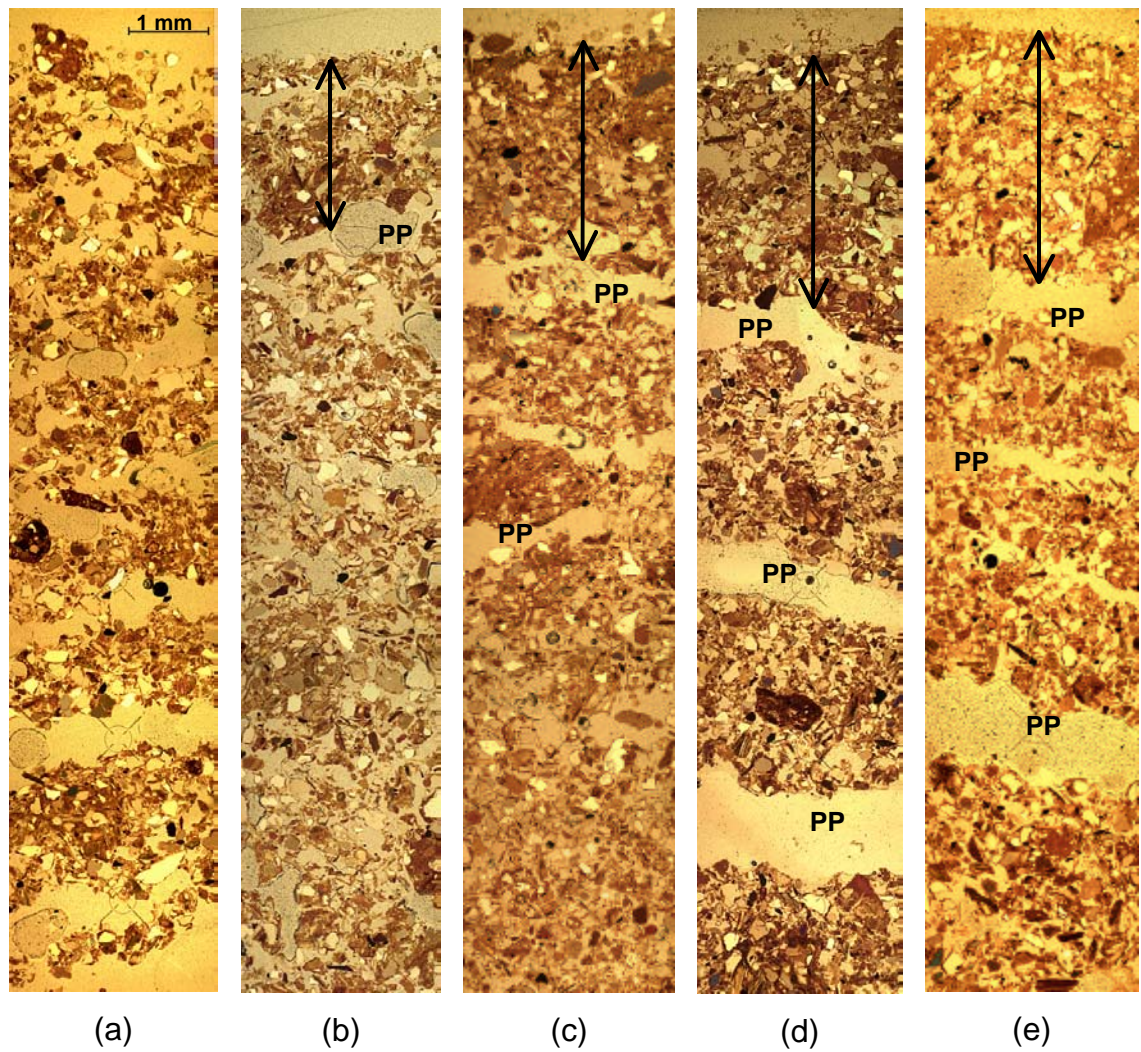


Figura 4.4. Fotomicrografias da superfície do Neossolo Flúvico submetido a energias cinéticas crescentes: 0 (a); 525 (b); 1051 (c); 2102 (d); e 4204 J m^{-2} (e). As setas indicam a extensão da crosta e PP, os poros planares.

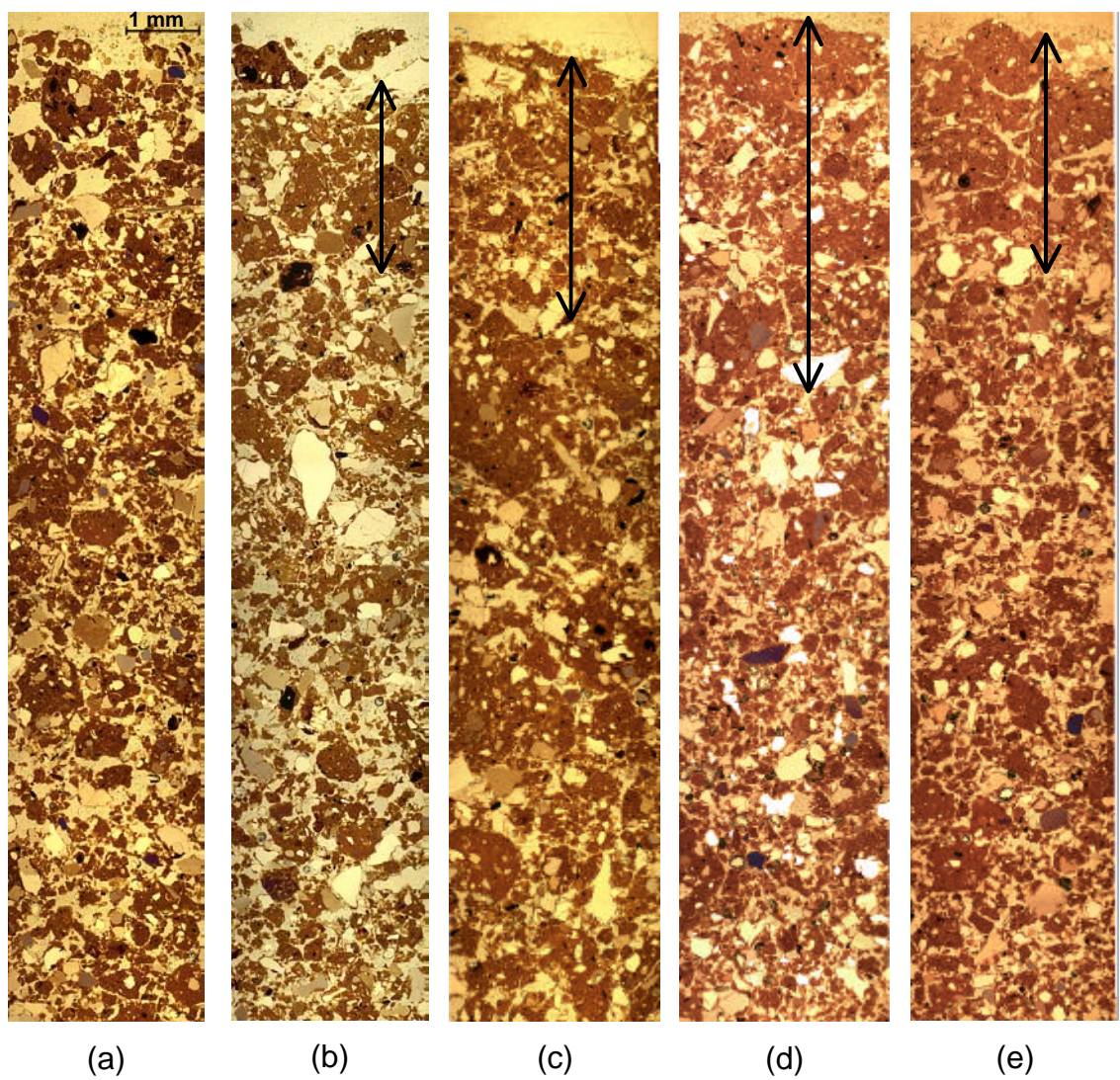


Figura 4.5. Fotomicrografias da superfície do Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a energias cinéticas crescentes: 0 (a); 525 (b); 1051 (c); 3153 (d); e 4204 J m^{-2} (e). As setas indicam a extensão da crosta.

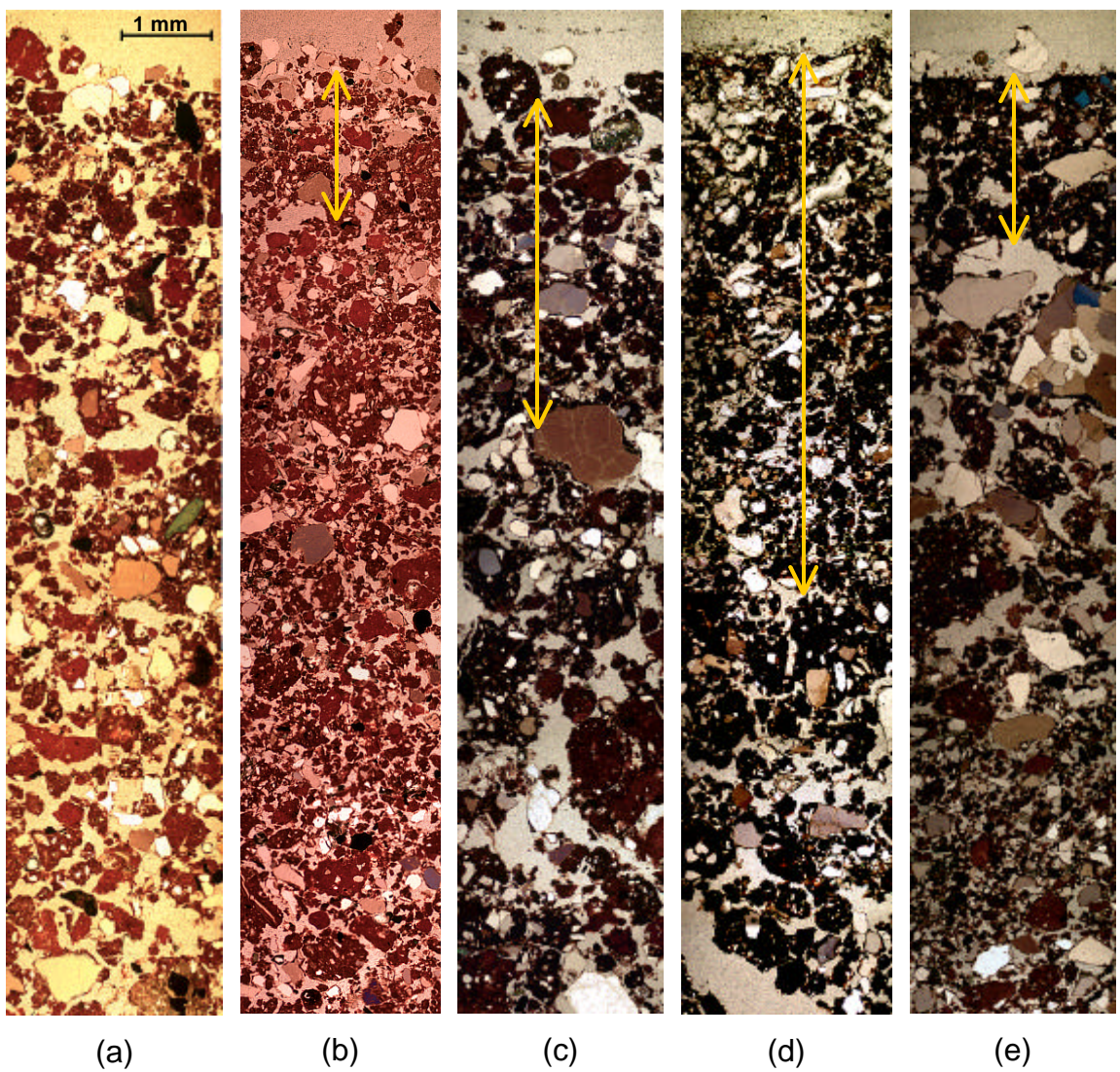


Figura 4.6. Fotomicrografias da superfície do Argissolo Vermelho submetido a energias cinéticas crescentes: 0 (a); 525 (b); 1051 (c); 2102 (d); e 4204 J m⁻² (e). As setas indicam a extensão da crosta.

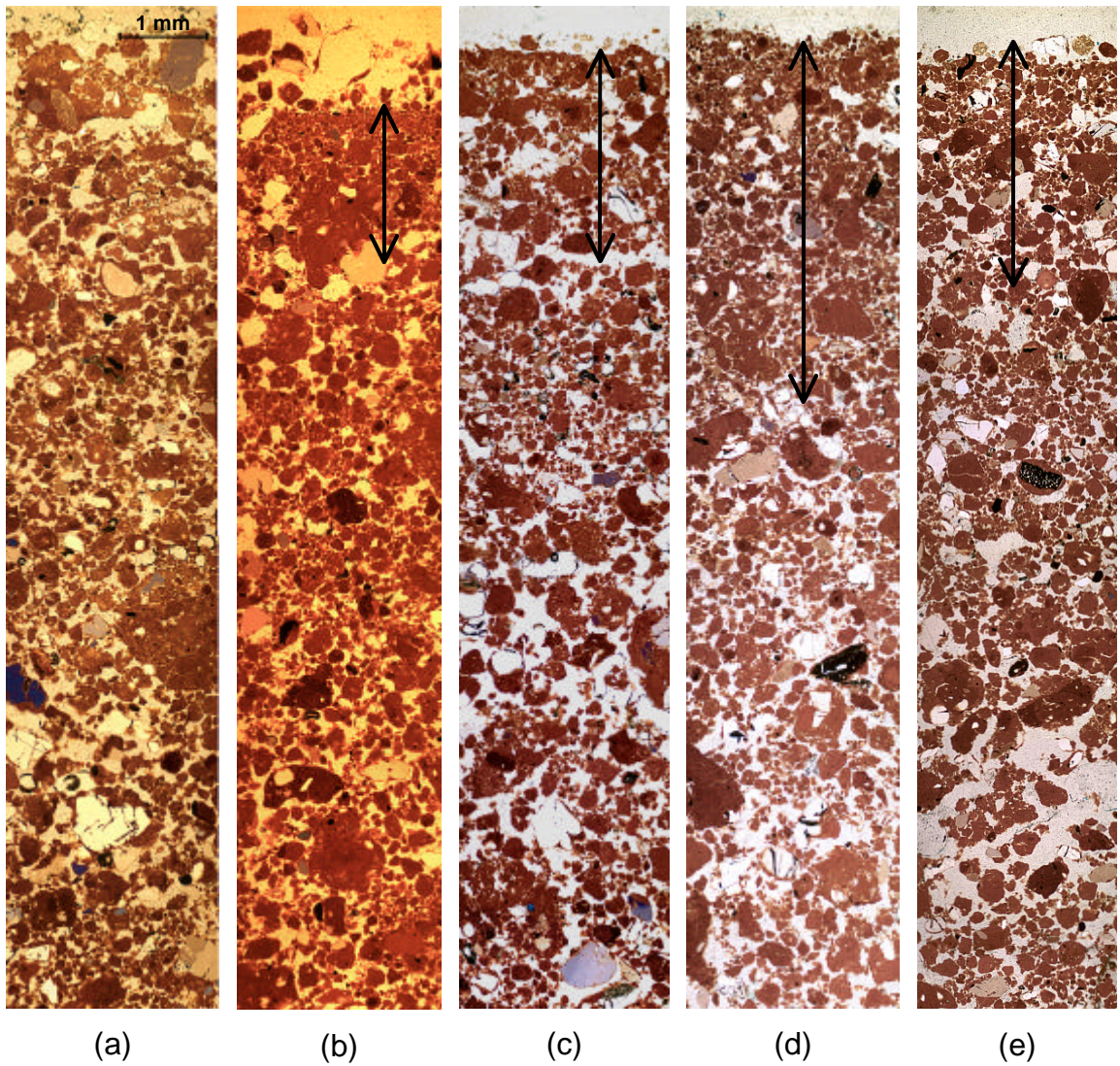


Figura 4.7. Fotomicrografias da superfície do Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a energias cinéticas crescentes: 0 (a); 525 (b); 1051 (c); 3153 (d); e 4204 J m⁻² (e). As setas indicam a extensão da crosta.

No LVA (Figura 4.7) observa-se um certo grau de empacotamento e destruição dos agregados da superfície, que promoveram uma redução da macroporosidade da camada superficial, que não foi tão drástica quanto aquela observada para o RUq, PVA e PV. Este comportamento pode ser explicado pela maior estabilidade dos agregados encontrados naquela classe de solo.

No Quadro 4.4 são apresentados os valores de espessura da crosta para os diferentes níveis de energia cinética aplicados e classes de solo.

Na Figura 4.8 são apresentados os gráficos e as equações ajustadas relacionando a espessura da crosta com a energia cinética aplicada, para as cinco classes de solo analisadas.

Quadro 4.4. Espessura da crosta considerando a energia cinética aplicada e a classe de solo

Ec	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
J m ⁻²	mm				
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
525	1,57	1,80	2,95	1,49	1,98
1051	2,51	2,14	3,25	2,78	1,83
2102	4,84	2,05	3,11	6,45	2,59
3153	7,41	1,42	3,46	4,70	3,11
4204	4,91	1,12	3,20	3,30	2,50
Média	3,54	1,42	2,66	3,12	2,00

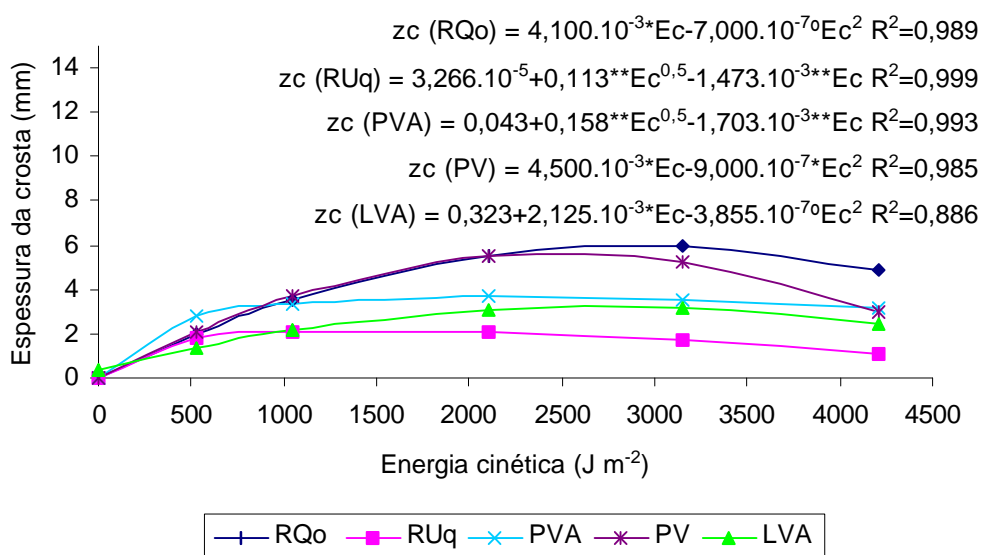


Figura 4.8. Espessura da crosta (zc) considerando a energia cinética aplicada (Ec) e a classe de solo.

** , * e °: significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste t.

Observa-se na Figura 4.8 que as maiores espessuras da crosta foram observadas para o Neossolo Quartzarênico e as menores para o Neossolo Flúvico. Como o Neossolo Quartzarênico é constituído essencialmente por grãos simples, a energia cinética de impacto direto da gota da chuva promoveu perturbação e acomodação destas partículas em uma estrutura relativamente mais espessa.

Já nos demais solos, parte da energia cinética de impacto direto da gota foi utilizada para quebrar e deformar os agregados da superfície e somente o restante desta energia foi utilizada na acomodação dos agregados e partículas simples. Assim, a estrutura formada pela reorganização das partículas de solo tornou-se menos espessa do que aquela formada pela reorganização das partículas de areia.

O aumento da energia cinética levou à formação e ao aumento da espessura da crosta, que após atingir um valor máximo, decresceu mesmo com o aumento da energia cinética, em decorrência do desgaste da crosta provocado pelo aumento da tensão cisalhante do escoamento superficial.

A partir das equações ajustadas foi possível determinar as energias cinéticas que produziram a maior espessura da crosta. Estes valores corresponderam a 3038 J m^{-2} para o RQo, 1465 J m^{-2} para o RUq, 2162 J m^{-2} para o PVA, 2595 J m^{-2} para o PV e 2756 J m^{-2} para o LVA.

Talvez fosse de se esperar que estes valores de energia cinética coincidisse com aqueles obtidos a partir das equações ajustadas para a taxa de infiltração, no entanto, menores taxas de infiltração não são consequência, exclusivamente, do aumento da espessura da crosta mas também da redução da condutividade hidráulica da mesma.

4.5. Condutividade hidráulica da crosta

Os valores obtidos de condutividade hidráulica da crosta para os diferentes níveis de energia cinética aplicada e classes de solo são apresentados no Quadro 4.5. Na Figura 4.9 são apresentados os gráficos e as equações ajustadas relacionando a condutividade hidráulica da crosta e a energia cinética aplicada.

Observa-se na Figura 4.9 que para o Neossolo Quartzarênico e o Argissolo Vermelho houve um aumento da condutividade hidráulica da crosta à medida que a energia cinética aplicada aumentava. Como a crosta é composta por duas camadas distintas, a região de encrostamento externo (“skin seal”) e a

do encrostamento interno (“washed-in”), então à medida que ocorreu o desgaste da crosta externa, que é mais compacta, a condutividade hidráulica da crosta aumentou. Embora o desgaste da crosta tenha sido um evento comum a todos os solos, este nem sempre promoveu aumento da condutividade hidráulica da crosta como um todo, o que pode ser atribuído à constante formação do encrostamento externo ou a valores muito baixos da condutividade hidráulica do encrostamento interno.

Já o Latossolo Vermelho-Amarelo não apresentou variação da condutividade hidráulica da crosta na faixa avaliada de energia cinética aplicada. Neste caso, o decréscimo da taxa de infiltração pode ser explicado somente pelo aumento da espessura da crosta, uma vez que este solo possui partículas minerais maiores e sem agregação.

Quadro 4.5. Condutividade hidráulica da crosta considerando a energia cinética aplicada e a classe de solo

Ec	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
J m ⁻²	mm h ⁻¹				
525	1,77	1,13	1,10	0,57	1,30
1051	1,50	1,42	0,61	0,54	1,09
2102	2,39	0,96	0,67	0,99	1,06
3153	3,38	0,79	0,52	1,07	1,25
4204	2,80	0,71	0,67	1,14	1,56
Média	2,37	1,00	0,71	0,86	1,25

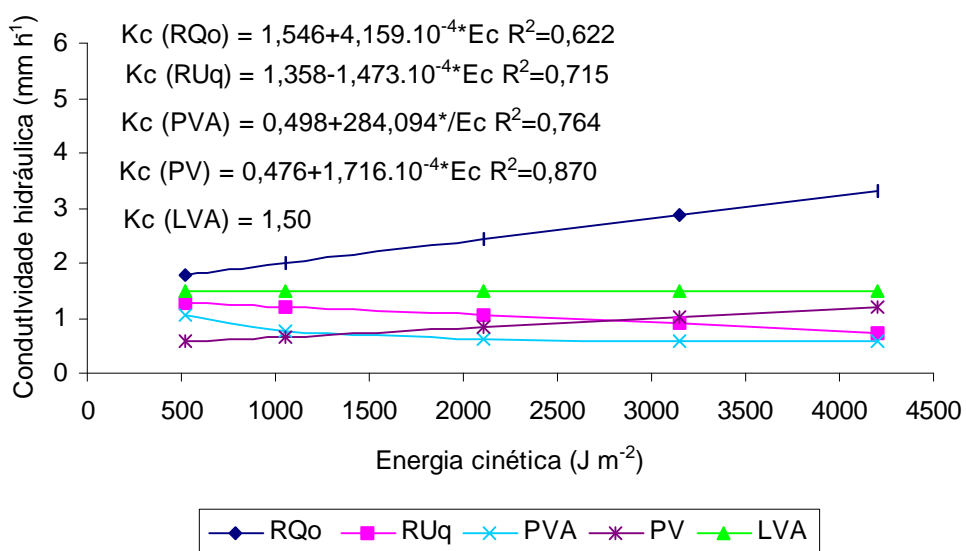


Figura 4.9. Condutividade hidráulica da crosta (Kc) considerando a energia cinética aplicada (Ec) e a classe de solo.

*: significativo a 5% pelo teste t.

A condutividade hidráulica da crosta do Argissolo Vermelho-Amarelo, por exemplo, apresentou um decréscimo inicial tendendo à estabilização quando foram aplicadas maiores energias cinéticas da chuva. Já no Neossolo Flúvico observou-se redução contínua da condutividade hidráulica da crosta com o aumento da energia cinética. Nestes dois solos este comportamento pode ser atribuído à forte compactação provocada pelo impacto das gotas de chuva.

4.6. Resistência hidráulica da crosta

Para fins de modelagem do processo de infiltração em solos sujeitos a encrostamento, é necessário tanto o conhecimento da espessura da crosta quanto da sua condutividade hidráulica. Desta forma, o parâmetro que permite associar estes dois fatores é a resistência hidráulica da crosta (Equação 3.3).

No Quadro 4.6 são apresentados os valores obtidos de resistência hidráulica da crosta para os diferentes níveis de energia cinética aplicada e classes de solo.

Na Figura 4.10 são apresentados os gráficos e as equações ajustadas de resistência hidráulica da crosta para cada energia cinética aplicada e classe de solo.

Os maiores valores de resistência hidráulica foram obtidos para o Argissolo Vermelho-Amarelo e o Argissolo Vermelho. No entanto, todos os solos apresentaram um pico de resistência hidráulica, sendo seguido de um decréscimo.

Quadro 4.6. Resistência hidráulica da crosta considerando a energia cinética aplicada e a classe de solo

Ec	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
J m ⁻²	h				
525	0,89	1,58	2,68	2,60	1,13
1051	1,67	1,51	5,32	5,13	2,08
2102	2,02	2,14	4,64	6,51	2,04
3153	2,19	1,79	6,63	4,38	2,02
4204	1,75	1,58	4,78	2,89	1,41
Média	1,71	1,72	4,81	4,30	1,74

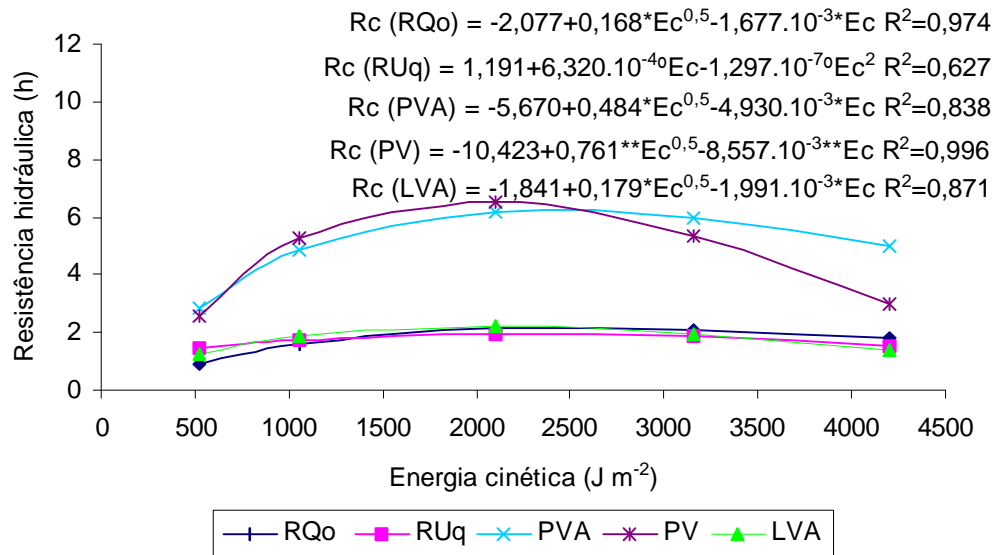


Figura 4.10. Resistência hidráulica da crosta (R_c) considerando a energia cinética aplicada (E_c) e a classe de solo
 **, * e °: significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste t.

As energias cinéticas que geraram máxima resistência hidráulica foram determinadas a partir das equações apresentadas na Figura 4.10. Os valores obtidos foram de 2520 J m⁻² para o RQo, 2437 J m⁻² para o RUq, 2411 J m⁻² para o PVA, 1979 J m⁻² para o PV e 2025 J m⁻² para o LVA. Estes valores aproximaram-se mais daqueles obtidos utilizando as equações de taxa de infiltração em função da energia cinética (Figura 4.1).

A Equação 4.2 foi ajustada utilizando regressão múltipla, tendo como variáveis dependente a resistência hidráulica e independentes algumas características físicas e químicas do solo e a energia cinética da chuva. Desta forma, a partir desta equação e do conhecimento de algumas características do solo e da chuva é possível estimar a resistência hidráulica da crosta originada pelo impacto direto da gota e a partir desta, a taxa de infiltração em solos sujeitos a encrostamento.

$$R_c = 24,8887 - 0,1849 ** AT + 0,1765 * St + 17,6050 *** ADA/Arg - 10,6490 * CO - 48,7346 * \phi_{macro} + 0,0002^\circ Ec \quad R^2 = 0,851 \quad (4.2)$$

em que:

R_c = resistência hidráulica da crosta, h;

AT = teor de areia total, dag kg⁻¹;

St = teor de silte, dag kg⁻¹;

ADA = teor de argila dispersa em água, dag kg⁻¹;

Arg = teor de argila total, dag kg⁻¹;

CO = teor de carbono orgânico, dag kg⁻¹;

ϕ_{macro} = macroporosidade da camada de 0-5cm (anel volumétrico), m³ m⁻³;

Ec = energia cinética acumulada, J m⁻²; e

°, *, ** e ***: significativos em nível de 10, 5, 1 e 0,1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Observa-se na Equação 4.2 que as variáveis independentes que se mostraram mais consistentes na descrição do comportamento da resistência hidráulica da crosta foram a energia cinética aplicada, a macroporosidade da camada de 0-5cm, os teores de areia total, silte e carbono orgânico e a relação entre os teores de argila dispersa em água e a argila total. O sinal positivo da constante que multiplica a energia cinética indica que à medida que esta aumenta, a resistência hidráulica da crosta também aumenta em decorrência do próprio desenvolvimento da crosta, que aumenta de espessura e, ou, apresenta redução da sua condutividade hidráulica.

O sinal negativo da constante que multiplica a macroporosidade indica que o solo com maior valor desta variável (Neossolo Quartzarênico) foi aquele que apresentou a maior taxa de infiltração, decorrente de uma menor resistência hidráulica da crosta.

A influência do teor de areia total no comportamento da resistência hidráulica da crosta está associada ao aumento da macroporosidade do solo. Desta forma, quanto maior a presença de areia, tanto menor a resistência hidráulica da crosta, o que explica o valor negativo da constante que multiplica o teor de areia. O oposto pode ser verificado para o teor de silte, uma vez que estas partículas preenchem os vazios do solo, dificultando a passagem de água para dentro do perfil do solo.

Os efeitos do teor de carbono orgânico do solo e da relação entre os teores de argila dispersa em água e argila total devem estar associados, uma vez que a matéria orgânica é um dos fatores determinantes da agregação das partículas do solo. Sendo assim, quanto maior o teor de carbono orgânico do solo maior será a sua estruturação, o que propicia uma menor resistência hidráulica da crosta. Daí os valores das constantes dessas variáveis serem negativos.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

A formação de crosta decorrente do impacto das gotas da chuva é um dos fatores que pode reduzir acentuadamente a infiltração e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial, contribuindo para a erosão do solo. Neste sentido, desenvolveu-se o presente trabalho, que teve os seguintes objetivos: avaliar a taxa de infiltração em solos sujeitos a encrostamento submetidos a diferentes energias cinéticas de chuva simulada; avaliar, por meio de análise micromorfológica, as características físicas e hídricas de crosta formada decorrente de aplicação de chuva simulada; e estabelecer modelo matemático que relacione a resistência hidráulica da crosta com as características físicas e químicas do solo e a energia cinética da chuva.

Para a determinação do decréscimo da taxa de infiltração da água no solo em decorrência da formação do encrostamento, foi realizado experimento no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola utilizando simulador de chuvas. Os tratamentos foram distribuídos em um esquema fatorial 5 x 6, sendo cinco solos (Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Flúvico e Neossolo Quartzarênico), seis energias cinéticas de chuva (0, 525, 1051, 2102, 3153 e 4204 J m⁻²) e três repetições. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado.

A avaliação do desenvolvimento do encrostamento foi feita por meio dos seguintes parâmetros: taxa de infiltração da água no solo, perda de

solo e porosidade da camada superficial do solo. Utilizando técnica de micromorfometria foi possível determinar algumas características do microperfil de solo superficial, tais como: macroporosidade, distribuição dos poros e sua continuidade e, ainda, a espessura da crosta. A partir dos dados de taxa de infiltração da água no solo e da espessura da crosta, determinaram-se a condutividade e a resistência hidráulica da crosta.

Uma vez determinada a resistência hidráulica da crosta estabeleceu-se por análise de regressão múltipla equações relacionando esta variável com a energia cinética da chuva e as características químicas e físicas de cada solo.

Com base nos resultados obtidos pôde-se concluir que:

- Em todas as classes de solo avaliadas evidenciou-se o desenvolvimento de encrostamento, caracterizado pela redução da taxa de infiltração quando foram aplicados valores crescentes de energia cinética da chuva;
- A partir das características de textura e estrutura do solo pode-se explicar o comportamento da infiltração em solos sujeitos ao encrostamento. Solos de textura grossa ou argilosos com estrutura microgranular mantiveram as maiores taxas de infiltração em condições de encrostamento;
- A análise micromorfológica mostrou-se um método eficiente na determinação das características físicas e hídricas da crosta;
- As características da crosta apresentaram variação temporal dependentes da energia cinética da chuva e da tensão cisalhante de escoamento superficial, que, por sua vez, levaram a formação de crosta estruturais e erosionais;
- A resistência hidráulica da crosta se mostrou uma variável adequada a ser utilizada nos modelos infiltração da água no solo para descrever a influência do encrostamento neste processo, uma vez que associa as características de espessura e condutividade hidráulica da crosta;
- As variáveis que se mostram mais efetivas na descrição do comportamento da resistência hidráulica da crosta foram a energia cinética da chuva, a macroporosidade superficial do solo, os teores de areia total, silte, argila total, argila dispersa em água, carbono orgânico e o grau flocculação do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J.A.; CASSOL, E.A.; REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.141-151, 2000.
- ALVES SOBRINHO, T. **Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil**. Viçosa: UFV, 1997. 85p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- ALVES, M.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.753-761, 1999.
- AMORIM, R.S.S. **Desprendimento e arraste de partículas de solo decorrentes de chuvas simuladas**. Viçosa: UFV, 2000. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.
- AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.124-130, 2001.
- BARBIERI, J. **Desenvolvimento de um linógrafo de baixo custo**. Cascavel: Universidade do Oeste do Paraná, 1993. 21p. (Apostila)
- BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Variability of infiltration in a field with surface-sealed soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.1299-1302, 1987.
- BERTOL, I.; COGO, N.P.; LIEVEN, R. Cobertura morta e métodos de preparo do solo na erosão hídrica em solo com crosta superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.373-379, 1989.

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.
- BRAKENSIEK, D.L.; RAWLS, W.J. Agricultural management effects on soil water processes Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.6, p.1753-1757, 1983.
- BRANDÃO, V.S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2003. 98p.
- BRESSON, L.M.; BOIFFIN, J. Morphological characterization of crust development stages on an experimental field. **Geoderma**, v.47, p.301-325, 1990.
- CHAVES, H.M.L.; ORLOWSKI, E.; ROLOFF, G. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.141-147, 1993.
- CHEN, Y.; TARCHITZKY, J.; BROUWER, J.; MORIN, J.; BANIN, A. Scanning electron observations on soil crusts and their formation. **Soil Science**, v.12, n.1, p.49-55, 1980.
- DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo: metodologia**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 1997. 26p. (Caderno de extensão n. 29)
- DULEY, F.L. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. **Soil Science Society of American Proceedings**, v.4, p.60-64, 1939.
- EDWARDS, W.M.; LARSON, W.E. Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. **Transactions of the ASAE**, v.12, n.4, p.463-465,470, 1969.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997. 212p.
- EVANS, D.D.; BUOL, S.W. Micromorphological study of soil crusts. **Soil Science Society of American Proceedings**, v.32, p.19-22, 1968.
- FARIA, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; RUIZ, H.A.; COSTA, L.M. Effects of weed control on physical and micropedological properties of brazilian ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.731-741, 1998.
- FERNANDES FILHO, E.I.; VIANA, J.H.M. Quantiporo: um novo programa para tratamento e quantificação de imagens digitais para aplicações em Ciência do Solo. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Londrina: SBCS, 2001. **Anais...** Londrina: SBCS/EMBRAPA/IAPAR/UEL/UEM, 2001. p.224.
- FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O.; RHOADES, J.D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on

- clay dispersion and soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, p.32-39, 1978.
- HARRIS, R.F.; CHESTERS, G.; ALLEN O.N. Dynamics of soil aggregation. **Advances in Agronomy**, v.18, p.107-160, 1965.
- HILLEL, D. **Applications of soil physics**. California: Academic Press, 1980a. 385p.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. California: Academic Press, 1980b. 413p.
- HILLEL, D.; GARDNER, W.R. Steady infiltration into crust-topped profiles. **Soil Science**, v.108, n.2, p.137-142, 1969.
- HILLEL, D.; GARDNER, W.R. Transient infiltration into crust-topped profiles. **Soil Science**, v.109, n.2, p.69-76, 1970.
- HILLS, D.J.; GU, Y. Sprinkler volume mean droplet diameter as a function of pressure. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.2, p.471-476, 1989.
- HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of American Proceedings**, v.5, p.399-417, 1940.
- McINTYRE, D.S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Science**, v.85, p.185-189, 1958a.
- McINTYRE, D.S. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. **Soil Science**, v.85, p.261-266, 1958b.
- MEIN, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v.9, n.4, p.384-394, 1973.
- MERMUT, A.R.; LUK, S.H.; RÖMKENS, M.J.M.; POESEN, J.W.A. Micromorphological and mineralogical components of surface in loess soils from different geographic regions. **Geoderma**, v.66, p.71-84, 1995.
- MEYER, L.D. Rainfall simulators for soil erosion research. In: LAL, R. (Ed.) **Soil Erosion Research Methods**. 2. ed. Florida: St. Lucie Press, 1994. p.83-103.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Interrill runoff and erosion: effects of row-sideslope shape, rain energy, and rain intensity. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.4, p.1199-1203, 1992.
- MOORE, I.D. Effect of surface sealing on infiltration. **Transactions of the ASAE**, v.24, n.6, p.1546-1552, 1981a.
- MOORE, I.D. Infiltration equations modified for surface effects. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE 107(IR1), p.71-86, 1981b.

- MOORE, I.D.; EIGEL, J.D. Infiltration into two-layered soil profiles. **Transactions of the ASAE**, v.24, n.6, p.1496-1503, 1981.
- MOORE, I.D.; LARSON, C.L. An infiltration-runoff model for cultivated soils. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.6, p.1460-1467, 1980.
- MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soil and sediments**. Berkamsted: Academic Publisher, 1986. 149p.
- NORTON, L.D. Micromorphological study of surface seals developed under simulated rainfall. **Geoderma**, v.40, p.127-140, 1987.
- OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais dos solos do Brasil: guia auxiliar para o seu reconhecimento**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.
- OLIVEIRA, M.L. **Camadas superficiais adensadas em resposta à radiação solar, temperatura e umidade do solo**. Viçosa: UFV, 2000, 67p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.
- OLIVEIRA, R.A. **Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo**. Viçosa: UFV, 1991. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.
- PARR, J.F.; BERTRAND, A.R. Water infiltration into soil. **Advances in Agronomy**, v.12, p.331-358, 1960.
- PHILIP, J.R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. **Soil Science**, v.83, p.345-357, 1957.
- PREVEDELO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: [s.n.], 1996. 446p.
- PRUSKI, F.F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E.F.; BALBINO, L.C.; FERREIRA, P.A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L.T. Infiltração da água num Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.1, p.77-84, 1997.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SONI, B. Agricultural management effects on soil water processes Part II: Green and Ampt parameters for crusting soils. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.6, p.1747-1752, 1983.
- RAWLS, W.L.; DAVID, G.; van MULLEN, J.A.; WARD, T.J. Infiltration. In: [s.n.] **Hidrology Handbook**. 2. ed. New York: ASCE, 1996. p.75-124. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28).
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.289-298, 1992.

- RODRIGUES, L.N. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. Viçosa: UFV, 1999, 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- SCHAEFER, C.E.G.R. **Soils and paleosols from northeastern Roraima, north Amazonia: geomorphology, genesis and landscape evolution**. Reading: University of Reading, 1994. 353p. (PhD Thesis)
- SEGINER, I. Tangencial velocity of sprinkler drops. **Transactions of the ASAE**, v.8, n.1, p.90-93, 1965.
- SHAINBERG, I.; LEVY, G.J. Infiltration and seal formation processes. In: Agassi, M. (Ed.) **Soil erosion, conservation, and rehabilitation**. New York: Marcel Dekker, 1995. p.1-22.
- SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. **Medições de infiltração com infiltrômetros e um simulador de chuvas em Latossolo Roxo Distrófico, Paraná, sob vários tipos de cobertura do solo e sistemas de preparo**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1984.13p.
- SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R.; MERMUT, A.R.; BENKE, M.B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em Latossolos Amarelos coesos do Estado de Alagoas: propriedades micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.515-525, 1998.
- SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p.32, n.2, p.213-220, 1997.
- SILVA, C.L.; KATO, E. Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.7, 1998. (Não paginado)
- SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; AMORIM, R.S.S. Escoamento superficial para diferentes intensidades de chuva e porcentagens de cobertura num Podzólico Vermelho-Amarelo com preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**, v.21, n.1, p.12-22, 2001.
- SLATTERY, M.C.; BRYAN, R.B. Laboratory experiments on surface seal development and its effects on interrill erosion processes. **Journal of Soil Science**, v.43, p.517-529, 1992.
- STILLMUNKES, R.T.; JAMES, L.G. Impact energy of water droplets from irrigation sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.1, p.130-133, 1982.
- VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. **Geoderma**, v.55, p.225-245, 1992.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadros de análise de variância para os parâmetros: taxa de infiltração, perda de solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade.

Quadro 1A. Análise de variância da taxa de infiltração considerando a energia cinética e os solos RQo e LVA

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	1	15597,880**
Ec d/RQo	5	61931,090**
Ec d/LVA	5	16354,770**
Resíduo	24	331,285
CV (%)		13,62

** significativos em nível de 1% de probabilidade pelo teste F

Quadro 2A. Análise de variância da taxa de infiltração considerando a energia cinética e os solos RUq, PVA e PV

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	2	4207,333**
Ec d/RUq	5	1633,633**
Ec d/PVA	5	1710,941**
Ec d/PV	5	8574,517**
Resíduo	36	30,714
CV (%)		10,08

** significativos em nível de 1% de probabilidade pelo teste F

Quadro 3A. Análise de variância da perda de solo considerando a energia cinética e a classe de solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	4	2115,058**
Ec d/RQo	5	196,941*
Ec d/RUq	5	2459,964**
Ec d/PVA	5	1543,818**
Ec d/PV	5	1353,893**
Ec d/LVA	5	401,345*
Resíduo	59	67,815
CV (%)		36,79

* e ** significativos em nível 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

Quadro 4A. Análise de variância da porosidade total considerando a energia cinética e a classe de solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	4	1598,450**
Ec d/RQo	5	1,820 ^{ns}
Ec d/RUq	5	1,586 ^{ns}
Ec d/PVA	5	1,508 ^{ns}
Ec d/PV	5	2,350 ^{ns}
Ec d/LVA	5	2,403 ^{ns}
Resíduo	59	1,211
CV (%)		1,79

** significativos em nível de 1% de probabilidade pelo teste F

^{ns} não significativos pelo teste F.

Quadro 5A. Análise de variância da macroporosidade considerando a energia cinética e os solos PVA e LVA

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	1	7,340 ^{ns}
Ec d/PVA	5	7,022 ^{ns}
Ec d/LVA	5	7,148 ^{ns}
Resíduo	24	9,540
CV (%)		14,26

^{ns} não significativos pelo teste F.

Quadro 6A. Análise de variância da macroporosidade considerando a energia cinética e os solos RQo, RUq e PV

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	2	218,880**
Ec d/RQo	5	5,016 ^o
Ec d/RUq	5	1,755 ^{ns}
Ec d/PV	5	7,999*
Resíduo	36	2,143
CV (%)		5,05

^o, * e ** significativos em 10, 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F

^{ns} não significativos pelo teste F.

Quadro 7A. Análise de variância da microporosidade considerando a energia cinética e os solos RQo e PV

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	1	5385,722**
Ec d/RQo	5	1,271*
Ec d/PV	5	2,615*
Resíduo	24	0,500
CV (%)		3,01

* e ** significativos em nível 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

Quadro 8A. Análise de variância da microporosidade considerando a energia cinética e os solos RUq e LVA

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo	1	129,390**
Ec d/RUq	5	0,403 ^{ns}
Ec d/LVA	5	3,241 ^{ns}
Resíduo	24	2,542
CV (%)		3,67

** significativos em nível de 1% de probabilidade pelo teste F

^{ns} não significativos pelo teste F.

Quadro 9A. Análise de variância da microporosidade considerando a energia cinética e o solo PVA

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Solo		
Ec d/LVA	5	4,303 ^{ns}
Resíduo	12	10,230
CV (%)		7,56

^{ns} não significativos pelo teste F.

APÊNDICE B

Valores de macroporosidade média determinados a partir da manipulação das imagens obtidas no microscópio com a utilização do programa computacional Quantiporo.

Quadro 1B. Macroporosidade, expressa em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, considerando a profundidade do solo, a energia cinética aplicada e a classe de solo¹

Profundidade	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
mm	Ec = 0 J m⁻²				
0,5	0,296	0,410	0,251	0,234	0,252
1,4	0,270	0,427	0,239	0,234	0,250
2,8	0,330	0,460	0,213	0,250	0,268
4,6	0,336	0,477	0,204	0,264	0,267
6,5	0,360	0,468	0,220	0,284	0,214
8,4	0,351	0,458	0,256	0,280	0,227
10,2	0,370	0,459	0,287	0,292	0,218
12,1	0,364	0,508	0,269	0,283	0,236
13,9	0,358	0,417	0,287	0,258	0,257
15,8	0,358	0,414	0,263	0,269	0,237
Média	0,339	0,450	0,249	0,265	0,243
	Ec = 525 J m⁻²				
0,5	0,298	0,313	0,204	0,203	0,256
1,4	0,313	0,409	0,207	0,230	0,238
2,8	0,351	0,471	0,246	0,245	0,235
4,6	0,402	0,423	0,259	0,280	0,258
6,5	0,381	0,443	0,246	0,266	0,244
8,4	0,372	0,411	0,257	0,240	0,251
10,2	0,351	0,440	0,249	0,263	0,268
12,1	0,348	0,454	0,268	0,272	0,280
13,9	0,336	0,389	0,264	0,238	0,284
15,8	0,355	0,412	0,248	0,232	0,294
Média	0,351	0,412	0,245	0,247	0,261

Continua...

¹ A ausência de dados para a energia cinética de 2102 J m⁻², para os solos RQo, PVA e LVA, e 3153 J m⁻² para os RUq e PV, se deve ao fato de que para diminuir o número de lâminas a serem confeccionadas foi excluído um valor de energia cinética para cada classe de solo.

Quadro 1B. (cont.)

Profundidade	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
mm	Ec = 10501 J m⁻²				
0,5	0,324	0,218	0,141	0,251	0,235
1,4	0,329	0,389	0,176	0,199	0,282
2,8	0,443	0,437	0,202	0,198	0,295
4,6	0,400	0,435	0,191	0,224	0,307
6,5	0,352	0,462	0,216	0,215	0,310
8,4	0,349	0,449	0,188	0,233	0,303
10,2	0,344	0,461	0,245	0,259	0,301
12,1	0,318	0,419	0,223	0,247	0,332
13,9	0,334	0,367	0,239	0,262	0,356
15,8	0,331	0,371	0,213	0,278	0,310
Média	0,352	0,388	0,203	0,237 0,251	0,303
	Ec = 2102 J m⁻²				
0,5		0,232		0,211	
1,4		0,324		0,189	
2,8		0,361		0,217	
4,6		0,385		0,236	
6,5		0,343		0,235	
8,4		0,351		0,233	
10,2		0,349		0,271	
12,1		0,318		0,325	
13,9		0,321		0,307	
15,8		0,265		0,290	
Média		0,329		0,251	

Continua...

Quadro 1B. (cont.)

Profundidade	Classes de solo				
	RQo	RUq	PVA	PV	LVA
mm	Ec = 3153 J m⁻²				
0,5	0,318		0,144		0,201
1,4	0,342		0,238		0,236
2,8	0,386		0,268		0,263
4,6	0,360		0,250		0,281
6,5	0,318		0,230		0,290
8,4	0,330		0,238		0,292
10,2	0,348		0,254		0,306
12,1	0,350		0,236		0,282
13,9	0,396		0,226		0,335
15,8	0,405		0,273		0,309
Média	0,355		0,236		0,280
	Ec = 4204 J m⁻²				
0,5	0,276	0,238	0,173	0,201	0,269
1,4	0,335	0,308	0,230	0,195	0,275
2,8	0,312	0,374	0,225	0,241	0,260
4,6	0,307	0,407	0,249	0,198	0,283
6,5	0,316	0,373	0,250	0,208	0,322
8,4	0,329	0,345	0,241	0,214	0,339
10,2	0,331	0,293	0,242	0,209	0,299
12,1	0,328	0,300	0,270	0,240	0,277
13,9	0,333	0,302	0,244	0,258	0,303
15,8	0,362	0,270	0,254	0,312	0,321
Média	0,323	0,340	0,238	0,228	0,295