

CLAUDINEI ANTONIO MONTEBELLER

**INFLUÊNCIA DOS PERFIS DE PRECIPITAÇÃO  
NAS PERDAS DE SOLO E ÁGUA**

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  
2009

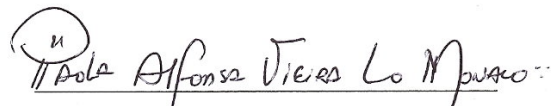
CLAUDINEI ANTONIO MONTEBELLER

**INFLUÊNCIA DOS PERFIS DE PRECIPITAÇÃO  
NAS PERDAS DE SOLO E ÁGUA**

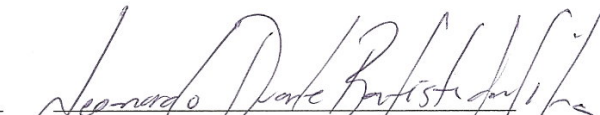
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.


APROVADA: 10 de agosto de 2009.

  
Prof. Demetrius David da Silva  
(Coorientador)

  
Prof.ª Paola Alfonsa Vieira Lo Monaco

  
Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

  
Prof. Leonardo Duarte Batista da Silva

  
Prof. Fernando Falco Pruski  
(Orientador)

À Deus.

Aos meus pais Benvindo José Montebeller e Maria José Montebeller.

Aos meus irmãos Sidney e Elizabete.

Ao meu amor Roberta.

Dedico.

"A essência do sábio é ser como a água. Por assim ser, se nivela por baixo, penetra em todos os lugares e nada força, mas tudo alcança. Não será atingido e não agride o agressor, mas todo agressor se molha."

Lao Tsu

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."

Chico Xavier

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pelo sopro de vida até o último momento conquistado.

Aos meus familiares, meus pais Benvindo e Maria, meus irmãos Sidney e Elizabete pelo apoio e incentivo.

Ao meu amor Roberta, pelos conselhos, pelo apoio, pelos momentos felizes e tristes que passamos juntos, e que esteve em todos os momentos ao meu lado, me ouvindo e incentivando.

Ao CNPq pela bolsa de estudos.

A Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao curso de posgraduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela orientação, pelos ensinamentos e pela paciência.

Aos Professores Demetrius David da Silva, Mauro Aparecido Martinez, Paulo Roberto Cecon e Daniel Fonseca de Carvalho, pelo apoio.

Ao Grupo de pesquisa do GPRH, Heber, João Felipe, Lívia, Nívia, Luiz, Juliana, Pedro e Luíza.

Aos colegas de trabalho Josiane, João Henrique, Mateus, Karine, Valfrido e Priscila.

Aos colegas da posgraduação, Eloy, Danilo, Renata, Fabiana, Antonio, Fernanda.

Aos grandes amigos cumpadre Reynaldo e cumadre Rosiane, pelos grandes momentos de alegria.

Aos funcionários da Hidráulica, Chicão e Eduardo, que contribuíram de forma esplendorosa para a realização deste trabalho, prometo nem pensar em dizer: “Liga a bomba ai pra nós”.

Aos funcionários da mecanização agrícola, Marcelo, Danilo e Vantuil.

À Dalva, Gelda, Isaura, Maria, Carmen, Cenir, Anália, Zeni, Elimar, Celso, Rodrigo e Jair pelas orações e incentivos.

A república os Pirigozo, Maurel, Mattiello, Eduardo, Roni, Jocimar, Diou, Salim, Ricardo, Jorge (Japa), Victor (Chinês), Erick, Henrique, Ciro e Isaias, pelo convívio e pelas grandes amizades.

Às Pirigozas Luciana, Rafaela e Aline, pelos conselhos e pelo convívio.

Aos amigos Nilton Cometti e Diene, muito obrigado pela ajuda.

À Zita, pela comida maravilhosa, pelo carinho e dedicação.

Ao Ricardo, Camilla e Maria Eduarda, que tanto me ouviram, aconselharam e rezaram por mim,

Aos grandes amigos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Adriano, Allan, Carla, Cristiane e Rodrigo.

A todos os amigos e colaboradores que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço.

## **BIOGRAFIA**

Claudinei Antonio Montebeller, filho de Benvindo José Montebeller e Maria José Montebeller, nasceu na cidade de Colatina, no Espírito Santo, no dia 13 de junho de 1979.

Cursou o segundo grau no Colégio Marista, em Colatina-ES, sendo concluído no ano de 1996.

Em agosto de 1997 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, na cidade de Seropédica-RJ, concluindo-o em outubro de 2002.

Em março de 2003 iniciou o curso de pós-graduação em nível de Mestrado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, obtendo o título de mestre em Agronomia-Ciência do Solo, área de concentração Manejo e Conservação de Solo e Água, em fevereiro de 2005.

Em março de 2005 iniciou o curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola-Recursos Hídricos, área de concentração Engenharia de Conservação de Solo e Água, em nível de Doutorado na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG, concluindo-o em agosto de 2009.

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT .....	xiiiv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1. Definição e formas de ocorrência da precipitação.....	3
2.2. Problemas relacionados à erosão hídrica .....	4
2.3. Processo de ocorrência da erosão hídrica .....	7
2.4. Fatores que influenciam o processo erosivo .....	9
2.5. Modelos de predição de perdas de solo.....	10
2.6 Influência da intensidade de precipitação no processo erosivo...	11
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	16
3.1. Perfis de precipitação .....	16
3.1.1. Perfil constante.....	16
3.1.2. Perfil exponencial decrescente.....	17
3.1.3. Perfil duplo exponencial adiantado.....	17
3.1.4. Perfil duplo exponencial atrasado .....	18
3.1.5. Erosividade associada aos perfis de precipitação.....	19
3.2. Descrição do experimento.....	20
3.2.1. Simulador de chuvas .....	20
3.2.2. Calibração do simulador de chuvas .....	23

3.2.3. Ajuste dos perfis de precipitação.....	25
3.2.4. Caracterização do solo.....	28
3.3. Realização do experimento.....	28
3.3.1. Determinação das perdas de solo.....	29
3.3.2. Determinação das perdas de água.....	30
3.4. Análise estatística.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1. Primeira e segunda aplicações.....	32
4.2 Terceira aplicação.....	35
4.2.1 Perdas de água.....	35
4.2.2 Perdas de solo.....	44
5. CONCLUSÕES.....	54
6. RECOMENDAÇÕES.....	55
7. REFERÊNCIAS.....	56
APÊNDICES.....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfis de precipitação utilizados no experimento. ....	20
Figura 2. Simulador de chuvas utilizado no experimento. ....	21
Figura 3. Esquema do controle computacional do simulador. ....	21
Figura 4. Interface do programa computacional para controle do simulador de chuvas. ....	22
Figura 5. Parcela experimental e calha coletora. ....	23
Figura 6. Estrutura utilizada para a calibração do simulador de chuvas na área experimental. ....	23
Figura 7. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação constante. ....	26
Figura 8. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação exponencial decrescente. ....	26
Figura 9. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado. ....	27
Figura 10. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação duplo exponencial atrasado. ....	27
Figura 11. Estrutura de coleta de água e solo. ....	30
Figura 12. Condições da superfície do solo antes (a), e depois da primeira aplicação (b) para o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado. ....	33

Figura 13. Condições da superfície do solo antes (a), e depois da segunda aplicação (b) para o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.....	35
Figura 14. Teste de Tukey para as médias de perdas de água referentes às seis repetições realizadas na terceira aplicação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de significância. ....	36
Figura 15. Condições da superfície do solo antes (a), e depois da terceira aplicação (b) para o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado. ....	37
Figura 16. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil constante na terceira aplicação e considerando seis repetições.....	40
Figura 17. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil exponencial negativo na terceira aplicação e considerando seis repetições. ....	41
Figura 18. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial adiantado na terceira aplicação e considerando seis repetições..	42
Figura 19. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial atrasado na terceira aplicação e considerando seis repetições. ...	43
Figura 20. Taxas médias de escoamento superficial em função da lâmina aplicada acumulada para os diferentes perfis de precipitação, referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições....	43
Figura 21. Teste de Tukey para as médias de perdas de solo referentes às seis repetições realizadas na terceira aplicação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de significância..	46
Figura 22. Taxas de perdas de solo em função da lâmina total aplicada acumulada para os diferentes perfis de precipitação, referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições.....	47
Figura 23. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil constante na terceira aplicação e considerando seis repetições.....	49

- Figura 24. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil exponencial negativo na terceira aplicação e considerando seis repetições..... 50
- Figura 25. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial adiantado na terceira aplicação e considerando seis repetições. ... 50
- Figura 26. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial atrasado na terceira aplicação e considerando seis repetições. .... 51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias e desvios-padrão para as perdas de água referentes à segunda aplicação e considerando seis repetições .....	33
Tabela 2. Médias e desvios-padrão para as perdas de solo referentes à segunda aplicação e considerando seis repetições .....	34
Tabela 3. Análise de variância e coeficientes de variação para as perdas de água e de solo referentes à segunda aplicação e considerando seis repetições.....	34
Tabela 4. Médias e desvios-padrão para as perdas de água referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições.....	35
Tabela 5. Análise de variância e coeficientes de variação para as perdas de água referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições .....	36
Tabela 6. Médias e desvios-padrão para as perdas de solo referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições.....	44
Tabela 7. Análise de variância e coeficientes de variação para as perdas de solo referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições .....	45

## RESUMO

MONTEBELLER, Claudinei Antonio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2009. **Influência dos perfis de precipitação nas perdas de solo e água.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientadores: Demetrius David da Silva e Mauro Aparecido Martinez.

A precipitação é considerada o principal fator climático relacionado à degradação de terras agrícolas e, entre suas características, a intensidade se destaca como o principal fator condicionador do processo erosivo. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a influência de diferentes perfis de precipitação nas perdas de solo e água. Foram definidos quatro perfis de precipitação: exponencial negativo, duplo exponencial adiantado, duplo exponencial atrasado e um perfil com intensidade constante, que foram aplicados por meio de um simulador de chuvas, sendo uma lâmina total de 55 mm e duração de 30 min comum a todos os perfis. O simulador foi instalado em uma área experimental cujo solo foi classificado como Cambissolo Háplico. Os tratamentos consistiram na simulação dos quatro perfis de precipitação em condições de solo descoberto, aplicados por três vezes em intervalos de 24 h, caracterizando três condições iniciais de umidade do solo: baixa, intermediária e alta. Assim, os tratamentos foram definidos pela combinação dos perfis de precipitação e das condições de umidade inicial do solo, sendo realizadas para cada um deles seis repetições. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC) e os totais de perdas de água e solo submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey (5%). Durante

a primeira aplicação, que consistiu na simulação de chuvas em solos com baixa umidade inicial, não houve escoamento superficial e, conseqüentemente, não ocorreram perdas de solo. Na segunda aplicação, condição em que os solos se encontravam com umidade inicial intermediária, não foram obtidas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos devido à alta variabilidade observada. Na terceira aplicação foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, para solos com condições de umidade próxima à saturação. As maiores perdas de água e de solo foram obtidas para o perfil exponencial negativo, seguido pelos perfis duplo exponencial atrasado, adiantado e o constante. Assim, foi possível concluir que houve influência dos perfis de precipitação nas perdas de solo e água, porém apenas para os tratamentos com umidade do solo próxima a saturação.

## ABSTRACT

MONTEBELLER, Claudinei Antonio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August of 2009. **Rainfall profiles influence on soil and water losses.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-advisers: Demetrius David da Silva and Mauro Aparecido Martinez.

Rainfall is considered the main climatic factor related to the degradation of agricultural lands, and among their characteristics the intensity stands out as the main conditioning factor of the erosive process. The present work had the objective of evaluating the influence of different precipitation profiles in the soil and water losses. Four precipitation profiles were considered: exponential negative, forwarded double exponential, delayed double exponential and a profile with constant intensity, being the total applied depth of 55 mm and duration of 30 min. The simulator was installed in an experimental area with Inceptsol. The treatments consisted in the simulation of the four precipitation profiles in conditions of bare soil, applied three times in 24 h-intervals, characterizing three initial conditions of soil moisture: low, medium and high. Thus the treatments were defined based on the combination of the precipitation profiles and the conditions of initial soil moisture, using six replications. It was used a completely randomized design, and the water and soil losses data were submitted to the analysis of variance (ANOVA) and the Tukey's test (5%). During the first application, which consisted in the simulation of rains in soils with low initial moisture there was not superficial runoff, consequently there was not soil loss. In the second application, where the soils were with intermediate

initial moisture, differences among the treatments were not obtained due to the high variability observed. In the third application, statistically significant differences among the treatments were found for soils with conditions of high moisture. The largest losses of water and soil were obtained with the negative exponential profile, followed by the delayed, forwarded and constant profiles. Therefore, it was possible to conclude that there was influence of the precipitation profiles on the soil and water losses, however only for the treatments with soils of high moisture.

## **1. INTRODUÇÃO**

Dentre os diversos componentes do ciclo hidrológico, pode-se afirmar que a precipitação é um dos mais importantes, pois determina a quantidade de água que se torna disponível para plantas e animais, o abastecimento dos reservatórios de águas subterrâneas e o escoamento superficial. É o elemento climático que exerce maior influência sobre as atividades humanas, pois interfere em diferentes setores sócio-econômicos e ambientais, como na geração e distribuição de energia elétrica, projeto e operação de reservatórios, gestão de recursos hídricos, no manejo de bacias hidrográficas, sistemas agrícolas e no controle do processo erosivo.

A precipitação também constitui o principal fator relacionado à degradação de terras agrícolas, sendo caracterizada como o agente desencadeador dos processos que envolvem a erosão hídrica devido à ação erosiva exercida pelo impacto das gotas e pelo escoamento superficial produzido. Uma das características das precipitações é a variação da intensidade ao longo da duração, a qual é considerada um fator condicionante do processo erosivo e é representada pelo perfil de precipitação.

A maior parte das pesquisas sobre precipitação no Brasil tem se restringido à previsão, baseada em séries históricas, da lâmina total máxima ou da intensidade máxima provável, as quais apresentam interesse principalmente em projetos de dimensionamento de estruturas hidráulicas (PINTO, 1995; FREITAS et al., 2001). No entanto, poucos trabalhos sobre erosão hídrica

consideram efetivamente o perfil da precipitação, o que pode promover distorções expressivas nas estimativas das perdas de solo e água.

Para as condições edafoclimáticas brasileiras, que são bastante variadas nas diversas regiões do país, este tipo de estudo pode fornecer informações importantes no que diz respeito ao uso do solo e manejo das práticas conservacionistas, podendo minimizar os problemas causados pela erosão hídrica. Neste contexto, a modelagem da erosão hídrica e de seus componentes são importantes aspectos no monitoramento e controle da degradação ambiental dos solos tropicais. Portanto, o conhecimento do perfil de precipitação e da sua influência nas perdas de água e solo é fundamental para o desenvolvimento e aplicação de modelos para melhor caracterização do processo erosivo. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência de diferentes perfis de precipitação nas perdas de solo e água.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Definição e formas de ocorrência da precipitação**

De acordo com Tucci (1997), precipitação é definida em hidrologia como sendo toda a água proveniente do meio atmosférico, na forma líquida ou sólida, que cai em direção à superfície terrestre, sendo as formas mais comuns a chuva, o granizo e a neve. É considerada uma das variáveis meteorológicas mais importantes para o estudo hidrológico de uma região, pois representa a ligação entre os demais fenômenos hidrológicos e o escoamento superficial, sendo este último a variável de maior interesse nas áreas científicas e de engenharia. Em países tropicais, como é o caso do Brasil, a forma de precipitação de maior interesse em estudos hidrológicos é a chuva.

O elemento básico para a formação das precipitações é a umidade do ar. Esse processo é considerado muito complexo em função das diversas formas de ocorrência podendo ser descrito basicamente da seguinte forma: inicialmente ocorre a condensação do vapor de água atmosférico formando pequenas gotículas de água com diâmetro que varia entre 10 e 20  $\mu\text{m}$ , ainda consideradas muito pequenas e leves para precipitarem. Com a continuidade do processo de condensação e aumento da quantidade de gotículas livres, começa a haver colisão entre elas e formação de gotas com maior diâmetro, que também é acelerado devido à presença de núcleos de condensação, provocando aglomeração até atingirem tamanho e massa suficientes para que possam precipitar.

As precipitações podem ser classificadas de acordo com as condições de sua formação em relação ao movimento vertical do ar existindo, assim, três tipos principais: frontais, convectivas e orográficas (VILLELA e MATTOS, 1975).

As precipitações frontais são aquelas que ocorrem devido ao encontro de massas de ar, sendo uma fria e densa e outra quente com maior umidade. Normalmente, ocasionam chuvas de baixa intensidade e longa duração, abrangendo grandes áreas.

As precipitações convectivas são aquelas típicas de regiões tropicais. A sua formação ocorre devido ao aquecimento diferenciado da superfície terrestre, provocando o aquecimento de camadas de ar com densidades diferentes. Dessa forma, há uma ascensão brusca da massa de ar menos densa. Essas precipitações caracterizam-se por apresentarem alta intensidade e curta duração e se concentrarem em pequenas áreas.

As precipitações orográficas são características de locais onde as massas de ar encontram obstáculos que dificultam sua movimentação. Ocorrem devido às condições da topografia local, sendo comumente observadas em regiões montanhosas e próximas ao litoral.

A distribuição da precipitação é um processo que comumente apresenta determinado grau de dependência espacial sendo caracterizada pela influência de fatores que definem a esta variável altas variabilidades espaciais e temporais (MONTEBELLER et al., 2007). Davis e Naghettini (2000) classificaram estes fatores em dois conjuntos: os estáticos, que são a latitude, altitude e proximidade dos oceanos; e os dinâmicos, que são os elementos ativos, como a movimentação de massas de ar, sendo a associação desses fatores a causa principal que caracteriza o regime pluviométrico de uma região.

## **2.2. Problemas relacionados à erosão hídrica**

A precipitação é o processo natural responsável pelo fornecimento de água à superfície terrestre, promovendo a recarga de aquíferos e mananciais, e tornando a água disponível para animais e vegetais. É considerada um dos principais elementos climáticos, pois interfere em diferentes setores sócio-econômicos, influenciando diretamente na geração e distribuição de energia,

na gestão de reservatórios de água e no manejo de bacias hidrográficas e de sistemas agrícolas.

As informações sobre as precipitações de uma determinada região, como a intensidade, duração e frequência, bem como sua distribuição espacial, são de grande importância para fins de planejamento, pois permitem o dimensionamento mais seguro de obras e estruturas hidráulicas destinadas à recepção do escoamento de águas pluviais e de conservação do solo (BAZZANO et al., 2007).

A precipitação se destaca como o agente responsável pelo desencadeamento de processos como o escoamento superficial e a erosão hídrica. Este tipo de erosão é responsável pela perda de milhões de toneladas de solo agricultável a cada ano e também por inúmeros prejuízos em áreas urbanas e em setores estratégicos da economia e da sociedade (PEREIRA et al., 2003).

A erosão do solo constitui uma das mais graves ameaças à gestão sustentável das terras agrícolas e vem se tornando motivo de grande preocupação em nível mundial. O problema é tão sério que muitos especialistas temem que nas próximas décadas não se consiga produzir alimentos suficientes para alimentar a população mundial, devido à perda da camada superficial do solo, ou seja, a camada mais rica em nutrientes e com melhores condições de preparo para o plantio.

Estudos sobre a degradação dos solos do mundo realizados pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1992 mostram que 35% da erosão mundial é causada por pastoreio excessivo, problemas típicos da África e Oceania. Outros 30% são resultados do desmatamento, com destaque para a Ásia e América do Sul, e 28% são áreas inutilizadas por cultivos intensivos e uso abusivo de produtos químicos. Os resultados desse estudo ainda mostram que 36 milhões de hectares degradados dificilmente serão recuperados; 1,1 milhão exigem investimentos acima das possibilidades dos países em desenvolvimento e outros 3,8 milhões precisam de medidas imediatas como drenagem e novas técnicas de plantio. Por ano, quase nove milhões de hectares são perdidos tornando-se economicamente inviáveis à atividade agrícola. Isso corresponde dizer que, a cada ano, os produtores mundiais têm

que alimentar mais 92 milhões de pessoas com 24 bilhões de toneladas de solo a menos (STROH e RALLOF, 1992).

Nos Estados Unidos é estimado que mais de um terço da camada superficial de áreas agrícolas cultivadas foi perdida nos últimos 200 anos (PIMENTAL et al., 1976), sendo que a maioria das terras agrícolas cultivadas no mundo apresenta taxas de erosão ainda mais altas que as observadas nessas condições (WILLIAMS et al., 1999).

Os custos anuais relativos à erosão nos Estados Unidos são estimados entre 30 (URI e LEWIS, 1998) e 44 bilhões de dólares (PIMENTAL et al., 1993), enquanto que na Inglaterra é da ordem de 90 milhões de euros (ENVIRONMENT AGENCY, 2002). Na Indonésia, apenas na Ilha de Java, os custos giram em torno de 400 milhões de dólares (MAGRATH e ARENS, 1989).

Na China, as taxas anuais de perdas de solo são estimadas em pelo menos  $15 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em todas as regiões do país. Na região Norte, onde se localiza a principal área de cultivo de cereais, houve uma redução da camada arável de 0,5 m nos últimos 60 anos, indicando grandes riscos na produção e no fornecimento de cereais para grande parte da população (SMIL, 2004).

Estimativas dos prejuízos associados à erosão hídrica no Brasil, feitas na década de 90, indicavam perdas de solos anuais em torno de 600 milhões de toneladas de solo agrícola (BAHIA et al., 1992). No início do século XXI, estimativas feitas por Hernani et al. (2002) indicavam perdas anuais de 823 milhões de toneladas de solo e de 171 bilhões de  $\text{m}^3$  de água. Novaes (2001) apresentou perdas anuais de um bilhão de toneladas para o Brasil e em torno de 23 bilhões de toneladas em nível mundial.

Segundo dados da FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) de 1994, cerca de 28% das terras brasileiras apresentam algum estágio de degradação, havendo tendência de aumento desses valores caso medidas emergenciais não sejam tomadas. No Rio Grande do Sul, as estimativas das perdas de solo são em torno de 80 milhões de toneladas anuais. Em São Paulo, a erosão nas áreas cultivadas com grãos é estimada em 200 milhões de toneladas por ano. Para o cerrado brasileiro, as estimativas estão em torno de 90 milhões de toneladas de solo fértil por ano, o

que corresponde a valores entre 6 e 10 kg de solo erodido por kg de grão produzido (NOVAES, 2001).

As consequências da ocorrência da erosão hídrica para o clima mundial também podem surgir de forma indireta. O aumento da exposição do material orgânico existente no solo implica na liberação de carbono para a atmosfera, o que afeta a qualidade do solo e sua capacidade de reter água e nutrientes. Tal fato indica que o efeito da erosão sobre o clima mundial ocorre em uma reação em cadeia, pois o aumento da concentração de carbono na atmosfera provoca alterações nas temperaturas e na distribuição das precipitações (LAL, 2003).

Uma estimativa do efeito das mudanças climáticas nas perdas de solo é de que no meio Oeste dos Estados Unidos ocorra um aumento de 39% até 2050, mesmo que sejam utilizadas práticas de conservação adequadas (WILLIAMS, 2000). Pruski e Nearing (2002) estimaram aumentos de até 41% nas perdas de água e 102% nas perdas de solo, considerando as mudanças climáticas esperadas no século XXI em várias localidades dos Estados Unidos.

### **2.3. Processo de ocorrência da erosão hídrica**

A erosão hídrica é um processo físico que consiste na remoção e transporte de partículas do solo pela ação dos agentes erosivos. Quando a energia fornecida pelo agente erosivo não é suficiente para o transporte de partículas, ocorre a fase de deposição.

O processo erosivo pode ser descrito da seguinte forma: com o início das chuvas parte do volume precipitado é retido pela vegetação e parte atinge a superfície do solo. O volume que atinge o solo é responsável pelo aumento da umidade e pela diminuição das forças coesivas dos agregados. Com a continuidade da chuva, devido ao impacto direto das gotas ocorre a quebra dos agregados em partículas menores e deposição nas camadas superficiais, havendo uma tendência a compactação, levando à formação do encrostamento superficial. A formação dessa camada tem como consequência a diminuição da capacidade de infiltração de água no solo. Assim, o empoçamento da água nas depressões da superfície do solo começa a ocorrer quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração ou quando a capacidade de

acumulação de água no solo for excedida. Quando esgotada a capacidade de retenção superficial do solo, se inicia o escoamento superficial.

Morgan (2005) descreveu o processo erosivo considerando o *momentum* de uma única gota caindo sobre uma superfície exposta. No instante do impacto, a componente vertical do *momentum* é transferida quase totalmente para a superfície do solo, retornando apenas uma parte da componente normal à superfície. Dessa forma, na transferência da energia ao solo ocorrem dois efeitos distintos: o primeiro deles atua como força consolidativa, compactando o solo; o segundo atua como força dispersiva, em função da rapidez com que a água se dispersa e retorna ao ponto de impacto.

Esses efeitos sobre o solo estão associados à velocidade final da gota de chuva, que por sua vez varia de acordo com o seu diâmetro. Gotas com até 1,0 mm de diâmetro atingem velocidade final de aproximadamente  $4,0 \text{ m s}^{-1}$ , e gotas com até 5,0 mm diâmetro podem atingir até  $9,0 \text{ m s}^{-1}$  (HUANG et al., 1982). O impacto das gotas de chuva contra o solo tem a capacidade de transferir energia cinética a algumas partículas de solo, lançando-as ao ar, juntamente com as gotículas de água, sendo este efeito denominado salpicamento ou splash.

O efeito de consolidação é caracterizado pela formação de uma camada de encrostamento, geralmente com poucos milímetros de espessura, que resulta da quebra de agregados do solo e entupimento dos poros pela compactação e deposição de partículas finas na superfície do solo.

Com a formação do escoamento superficial ocorre o transporte de partículas do solo, as quais sofrem deposição quando a velocidade do escoamento superficial é reduzida. Juntamente com as partículas de solo em suspensão, o escoamento superficial transporta nutrientes, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas que, além de causarem prejuízos diretos à produção agropecuária, causam a poluição e o assoreamento dos recursos hídricos. Assim, as perdas por erosão tendem a elevar os custos de produção, tendo em vista a necessidade de aumento do uso de corretivos e fertilizantes e a redução no rendimento operacional das máquinas agrícolas (PEREIRA, 2000; PARKER et al., 1995).

## **2.4. Fatores que influenciam o processo erosivo**

A erosão é um processo complexo, caracterizado por envolver vários fatores inter-relacionados que se manifestam com diferentes intensidades conforme o local de ocorrência (PIRES et al., 2006).

Os fatores que interferem no processo erosivo são: a precipitação, o solo, a declividade e o comprimento da encosta, a cobertura vegetal e as práticas de manejo. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1999), a precipitação é o elemento climático de maior importância para a ocorrência da erosão, pois é desta que dependem o volume e a velocidade do escoamento superficial, sendo sua intensidade a característica mais importante relacionada ao processo. Vários estudos mostram que as taxas de perdas de solo são diretamente proporcionais ao aumento dos valores de intensidade de precipitação (MORGAN, 2005).

A frequência de ocorrência das chuvas é um fator que também influencia nas perdas por erosão. Se os intervalos entre os eventos de precipitação forem pequenos, o conteúdo de água no solo será alto, quando da ocorrência de uma segunda precipitação, e assim o volume de água escoado na superfície do solo será maior. Por outro lado, para baixas frequências de precipitação, o solo deverá estar com baixo conteúdo de água e, portanto, o tempo para o início do escoamento superficial deverá ser maior, ou mesmo não ocorrerá escoamento quando a intensidade de precipitação for muito baixa (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999).

Os fatores que influenciam a capacidade de infiltração, como a condutividade hidráulica e a capacidade de retenção de água, e aqueles que conferem resistência dos agregados ao impacto das gotas de chuva e à força cisalhante do escoamento superficial são intrínsecos ao solo e fortes condicionadores do processo erosivo.

O comprimento e a declividade das vertentes são características do relevo local e sua influência está relacionada à energia potencial associada ao escoamento e ao ângulo de incidência das chuvas. Assim, vertentes mais íngremes favorecem a erosão do solo, à medida que proporcionam aumento da velocidade do escoamento superficial.

A cobertura vegetal, em função da sua densidade, tem a capacidade de oferecer ao solo proteção ao impacto direto das gotas da chuva, reduzir a velocidade do escoamento superficial e aumentar a resistência à tensão cisalhante associada ao escoamento. Por isso, a cobertura do solo atua como elemento dissipador de energia, favorecendo o controle do processo erosivo.

As práticas de manejo são as atividades de natureza antrópica que acabam por acelerar ou retardar o processo erosivo. Práticas que promovem a maior exposição dos solos à incidência das precipitações, como queimadas e derrubadas de florestas, e aquelas que promovem o enfraquecimento da estrutura dos solos, como a compactação e mecanização excessiva, favorecem a ação dos fatores erosivos. No entanto, práticas que visam a manutenção da cobertura vegetal, como o plantio direto e o uso de cobertura morta, e aquelas que visam melhorias das condições de fertilidade e da estrutura do solo, como adubação e calagem, promovem a atenuação da erosão. São destacadas também as práticas de caráter mecânico, que são aquelas que se utilizam de estruturas artificiais para a interceptação e condução do escoamento superficial, podendo-se relacionar o terraceamento e as barraginhas.

## **2.5. Modelos de predição de perdas de solo**

Um modelo é uma representação matemática de um fenômeno físico. Nesse sentido, a modelagem do processo de erosão é uma importante ferramenta no planejamento de medidas de controle eficientes e na escolha de práticas de conservação da água e do solo que possam minimizar estes impactos.

A utilização de modelos físico-matemáticos para a descrição do processo erosivo evoluiu de forma acentuada a partir da década de 50, com o advento da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) (SILVA e PRUSKI, 1997). Desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1958, a USLE é um modelo empírico que permite estimar as perdas de solo e identificar os fatores que exercem o maior efeito sobre estas.

Com o decorrer do tempo, diversas pesquisas têm ampliado o conhecimento dos processos que influem nas perdas de solo pela erosão hídrica e, conseqüentemente, na modelagem desse processo. O

desenvolvimento de procedimentos baseados em técnicas de simulação possibilitou análises mais detalhadas do processo erosivo, inclusive com a consideração das variações espaciais e temporais existentes nos fatores condicionadores do processo (PRUSKI et al., 1997), como é o caso do modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP).

Existem inúmeras diferenças entre os modelos de predição definidas pela forma que cada um deles descreve os fatores relacionados, pelos processos físicos simulados e pela dependência de dados de entrada, sendo esses os principais parâmetros para sua distinção e agrupamento.

Na RUSLE o componente hidrológico é representado pelo fator R, denominado índice de erosividade, e definido como a capacidade potencial da chuva em causar erosão numa área sem proteção. Este índice foi proposto por Wischmeier e Smith (1958) que encontraram forte correlação com as perdas de solo quando a energia cinética da chuva era relacionada à sua intensidade máxima num período de tempo de 30 minutos.

No modelo WEPP é utilizado um gerador de séries sintéticas que permite a estimativa de séries de precipitação compostas pela precipitação total diária, duração, tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea e a própria intensidade máxima instantânea de cada evento gerado (ZANETTI, 2003). Este modelo apresenta várias vantagens sobre outras tecnologias de previsão de erosão, pois a obtenção do perfil de precipitação permite estimar a distribuição espacial e temporal da perda de solo e sua deposição em cada posição da vertente. Tal fato possibilita simulações de eventos únicos, como também em períodos diários, mensais ou anuais (CHAVES, 1992).

## **2.6 Influência da intensidade de precipitação no processo erosivo**

As características físicas das precipitações têm grande influência sobre os processos relacionados à erosão hídrica, como na infiltração de água no solo e no escoamento superficial. Dentre as variáveis associadas às precipitações, a intensidade se destaca como a principal característica, principalmente quando relacionada à erosão entressulcos, devido aos efeitos

sobre a desagregação das partículas de solo através do impacto das gotas de chuva e na formação do escoamento superficial (TRUMAN et al., 2007).

Neste caso, a magnitude do processo erosivo irá depender da combinação de dois componentes energéticos associados ao processo: a capacidade de desagregação associada à intensidade de precipitação e a quantidade de sedimentos transportados pelo escoamento. O primeiro componente é responsável por ocasionar decréscimos nas taxas de infiltração em função da redução da capacidade de infiltração de água no solo devido à formação do encrostamento superficial. Esse efeito de formação de uma camada com menor condutividade hidráulica está diretamente relacionado à energia cinética das gotas de chuva, havendo uma tendência de aumento de sua espessura de acordo com a elevação das intensidades das precipitações (AMORIM et al., 2001).

Em condições onde as precipitações incidentes apresentam baixa intensidade, estas com menor capacidade de desagregação de partículas devido à baixa energia cinética das gotas, o principal efeito está relacionado ao umedecimento do solo, diminuindo as forças coesivas dos agregados, tornando-os mais susceptíveis a eventos posteriores com maior energia de desagregação (MORGAN, 2005).

O segundo componente associado ao processo erosivo é o escoamento superficial, que tem importante papel no processo erosivo devido sua capacidade de remoção e transporte de partículas de solo, e também está diretamente relacionado à intensidade de precipitação, pois tem efeito sobre a quantidade e o tamanho dos sedimentos transportados. Para um determinado tipo de solo, se a intensidade de precipitação afeta o tamanho das partículas transportadas ao longo do tempo conseqüentemente haverá, também, influência na quantidade total de sedimentos transportados. Resultados obtidos por Meyer et al. (1980) indicam elevada porcentagem de sedimentos com maior diâmetro de partículas para precipitações com intensidades mais elevadas.

Tendo a intensidade de precipitação influência direta sobre os dois componentes energéticos relacionados ao processo erosivo, a principal dificuldade para avaliar seu efeito sobre o volume escoado e na quantidade de solo transportado ocorre em função das alterações nas condições de superfície

do solo durante a chuva, tal como o desenvolvimento do encrostamento superficial, que é um processo dinâmico que se altera durante a ocorrência das precipitações.

Além dessas complexas relações entre as variáveis intensidade, infiltração e escoamento, as precipitações que apresentam variação da intensidade ao longo da duração podem não ter a mesma capacidade erosiva, mesmo apresentando a mesma intensidade média e energia cinética total associadas. Se a energia cinética da chuva é o fator que controla o encrostamento, o escoamento superficial e, também, a remoção de partículas do solo, o efeito de precipitações com o mesmo total precipitado que se diferenciam pelo tempo de ocorrência da intensidade máxima podem ter comportamentos bem diferenciados em termos de perdas de solo e água.

As precipitações caracterizadas pela alta intensidade inicial têm grande capacidade de desagregação de partículas, devido à maior energia cinética aplicada no início do evento. A alta intensidade tende a provocar quebra de agregados e rápida formação de encrostamento provocando, conseqüentemente, diminuição das taxas de infiltração. Com a continuidade da chuva, mesmo para baixas intensidades, pode-se observar a formação de escoamento superficial. Já as precipitações com intensidade máxima ocorrendo no final de sua duração conferem as maiores taxas de perdas de água e solo, pois a ocorrência da maior intensidade coincide quando o solo está com maior umidade, o que favorece a desagregação, o encrostamento superficial e o transporte de maior quantidade de partículas de solo (ELTZ et al., 2001).

Recentemente, devido ao maior conhecimento sobre as precipitações e pelo avanço no desenvolvimento de modelos baseados em processos para a descrição da erosão, os quais permitem obter os perfis de precipitação, pesquisadores têm dado maior atenção aos efeitos das variações da intensidade de precipitação no escoamento e no processo erosivo.

Flanagan et al. (1988) realizaram estudos para avaliar a influência de diferentes perfis de precipitação na infiltração e nas perdas de solo e água. Utilizaram um simulador de chuvas para aplicar seis perfis de precipitação com duração de uma hora, sendo quatro deles com pico de intensidade de 250 mm h<sup>-1</sup>, diferenciando-se o tempo de ocorrência do pico em intervalos de 20

minutos de aplicação (0, 20, 40 e 60 minutos), um com pico de  $125 \text{ mm h}^{-1}$  ocorrendo aos 20 minutos de aplicação e outro com intensidade constante de  $64 \text{ mm h}^{-1}$ . As maiores perdas de solo e água foram observadas nos perfis de precipitação com intensidade máxima ocorrendo no final da duração, enquanto que os menores valores foram obtidos para o perfil de precipitação com pico de  $125 \text{ mm h}^{-1}$ , sendo as diferenças observadas entre estes perfis de seis vezes para as perdas de solo e três vezes para as perdas de água.

Parsons e Stone (2006) avaliaram o efeito das variações da intensidade das chuvas sobre o escoamento superficial e a erosão hídrica. Nesse estudo os autores utilizaram cinco diferentes perfis de precipitação, com o mesmo total precipitado, mesma duração e energia cinética total associada. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que, para as perdas de água, não houve diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre os perfis de precipitação. Para as perdas de solo os autores encontraram grandes dificuldades para avaliações devido a possibilidade de intermitência no transporte de sedimentos.

Silva e Rossoni (2004) avaliaram a influência de diferentes perfis de precipitação nas perdas de solo e água. Neste trabalho foram utilizados quatro perfis de precipitação, que se diferenciaram pelo tempo de ocorrência da máxima intensidade, sendo assim denominados: perfil exponencial negativo, caracterizado por apresentar a máxima intensidade ocorrendo no início do evento; perfil duplo exponencial adiantado, com a intensidade máxima ocorrendo no terço inicial da duração; perfil duplo exponencial atrasado, com intensidade máxima ocorrendo no terço final da duração; e perfil constante, com intensidade de  $110 \text{ mm h}^{-1}$ . Os autores verificaram que o perfil duplo exponencial atrasado provocou maior perda de solo (cerca de  $1.006,80 \text{ g m}^{-2}$ , aproximadamente  $10 \text{ ton ha}^{-1}$ ) em relação aos perfis constante, exponencial decrescente e duplo exponencial adiantado, que apresentaram magnitudes inferiores nas perdas da ordem de 22,36 %, 25,85 % e 16,58 %, respectivamente. Neste mesmo estudo, os autores também verificaram maior perda de água para o perfil duplo exponencial atrasado (cerca de 36,35 mm), superando os padrões constante, exponencial decrescente e duplo exponencial adiantado em 14,2%, 5,2% e 6,8%, respectivamente.

Eltz et al. (2001) realizaram estudos de perdas de solo e água utilizando perfis de precipitação que se diferenciaram pelo tempo de ocorrência do pico de intensidade em relação ao tempo total da chuva: i) perfil avançado, quando a intensidade máxima ocorreu em um tempo inferior a 30% de duração da chuva; ii) perfil intermediário, quando a intensidade máxima ocorreu entre 30 e 60% da duração da chuva, e iii) perfil atrasado, quando a intensidade máxima ocorreu após passados mais de 60% do tempo total de duração das chuvas. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que as maiores perdas de solo e água ocorreram nos perfis intermediário e atrasado, devido à maior umidade que antecede a intensidade máxima da chuva.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Perfis de precipitação

Para o cumprimento dos objetivos propostos foram analisados quatro perfis de precipitação, descritos a seguir.

##### 3.1.1. Perfil constante

Este perfil foi representado pela intensidade máxima média de precipitação obtida com base na equação de intensidade, duração e frequência de precipitação correspondente à localidade de Viçosa, proposta por Freitas et al. (2001) e representada por:

$$i_m = \frac{3510,725T^{0,223}}{(t + 29,319)^{0,995}} \quad (1)$$

em que

$i_m$  = intensidade máxima média de precipitação, mm h<sup>-1</sup>;

T = período de retorno, ano; e

t = duração da precipitação, min.

Na aplicação da equação 1 adotou-se um período de retorno de 15 anos, valor comumente utilizado para o dimensionamento de estruturas de conservação de solo (LOMBARDI NETO, 1989), e uma duração de 30 minutos,

frequentemente utilizado em experimentos com simuladores de chuvas (DUNKERLEY, 2008), obtendo-se assim uma intensidade máxima média de  $110 \text{ mm h}^{-1}$  e um total precipitado de 55 mm. Estes mesmos valores de período de retorno, duração do evento e total precipitado foram utilizados para obtenção dos demais perfis de precipitação.

### 3.1.2. Perfil exponencial decrescente

O perfil exponencial decrescente é caracterizado por uma intensidade de precipitação que decresce ao longo da duração. A intensidade máxima instantânea ( $i_i$ ) foi obtida de acordo com a equação proposta por Pruski et al. (1997).

$$i_i = \left( \frac{3510,725T^{0,223}}{(t + 29,319)^{0,995}} \right) \left( 1 - \frac{0,995t}{t + 29,319} \right) \quad (2)$$

O período de retorno e a duração definidos anteriormente foram utilizados na equação 2, obtendo-se assim uma intensidade máxima instantânea inicial de  $222,8 \text{ mm h}^{-1}$  e intensidade instantânea final de  $54,9 \text{ mm h}^{-1}$ .

### 3.1.3. Perfil duplo exponencial adiantado

O perfil duplo exponencial (NICKS et al., 1995) foi expresso pelas equações:

$$i^*(t) = \begin{cases} f e^{gt} & \dots\dots\dots 0 \leq t \leq t_{im} \\ h e^{-jt} & \dots\dots\dots t_{im} < t \leq 1,0 \end{cases} \quad (3)$$

em que

- $i^*(t)$  = intensidade padronizada, decimal;
- $f, g, h, j$  = parâmetros do modelo duplo exponencial;
- $t$  = tempo padronizado, decimal; e

$t_{im}$  = tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, decimal.

Os parâmetros  $f$ ,  $g$ ,  $h$  e  $j$  foram determinados a partir das seguintes equações:

$$1 - e^{-g t_{im}} = \frac{g t_{im}}{i_m} \quad (4)$$

$$j = \frac{g t_{im}}{(1 - t_{im})} \quad (5)$$

$$f = i_m e^{-g t_{im}} \quad (6)$$

$$h = i_m e^{j t_{im}} \quad (7)$$

Os valores de  $t_{im}$  e  $i_m$  correspondem aos valores de entrada na equação 4 para obtenção do valor de  $g$  que deve ser determinado por um método iterativo, permitindo o cálculo de  $j$  na equação 5.

Para a obtenção dos valores reais da duração e intensidade instantânea para quaisquer pares de valores padronizados ( $t_{im}$ ,  $i^*(t)$ ), multiplicou-se o valor do tempo padronizado ( $t_{im}$ ) pela duração do evento e também o valor da intensidade padronizada ( $i^*(t)$ ) pela intensidade média.

Na obtenção do perfil duplo exponencial adiantado considerou-se que o tempo de ocorrência da intensidade máxima correspondeu a 30% da duração do evento, sendo a intensidade máxima igual a  $176 \text{ mm h}^{-1}$ .

#### **3.1.4. Perfil duplo exponencial atrasado**

O perfil duplo exponencial atrasado foi obtido fazendo uso do mesmo procedimento utilizado para a determinação do perfil duplo exponencial adiantado, sendo o tempo de pico para a ocorrência da intensidade máxima de precipitação igual a 70% da duração.

### 3.1.5. Erosividade associada aos perfis de precipitação

A erosividade para cada um dos perfis de precipitação foi calculada conforme metodologia proposta por WISCHMEIER e SMITH (1958), sendo utilizada a equação sugerida por FOSTER et al.(1981) para a conversão dos dados para o Sistema Internacional de Unidades (SI):

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log(I) \quad (8)$$

em que

$E_c$  = energia cinética por mm de chuva, em  $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ;

$I$  = intensidade de chuva, em  $\text{mm h}^{-1}$ .

A equação 8 foi aplicada em cada segmento de 1 min, considerando que os valores de intensidade durante este intervalo são constantes. O resultado obtido foi multiplicado pela lâmina precipitada em cada segmento, e em seguida foi realizada a soma de todos os valores para um mesmo perfil de precipitação obtendo-se, com isso, a energia cinética total ( $E_c$ ) para cada perfil.

Para obtenção da erosividade foi identificada, para cada perfil, sua lâmina máxima precipitada em 30 minutos, possibilitando a obtenção da intensidade máxima observada na mesma duração ( $I_{30}$ ), assim como, a posterior aplicação da equação 9 para cálculo do índice de erosividade  $EI_{30}$ .

$$EI_{30} = E_c I_{30} \quad (9)$$

em que

$EI_{30}$  = índice de erosividade,  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ ;

$I_{30}$  = intensidade máxima observada em uma duração de 30 min.

Na Figura 1 encontram-se representados os quatro perfis de precipitação estudados.

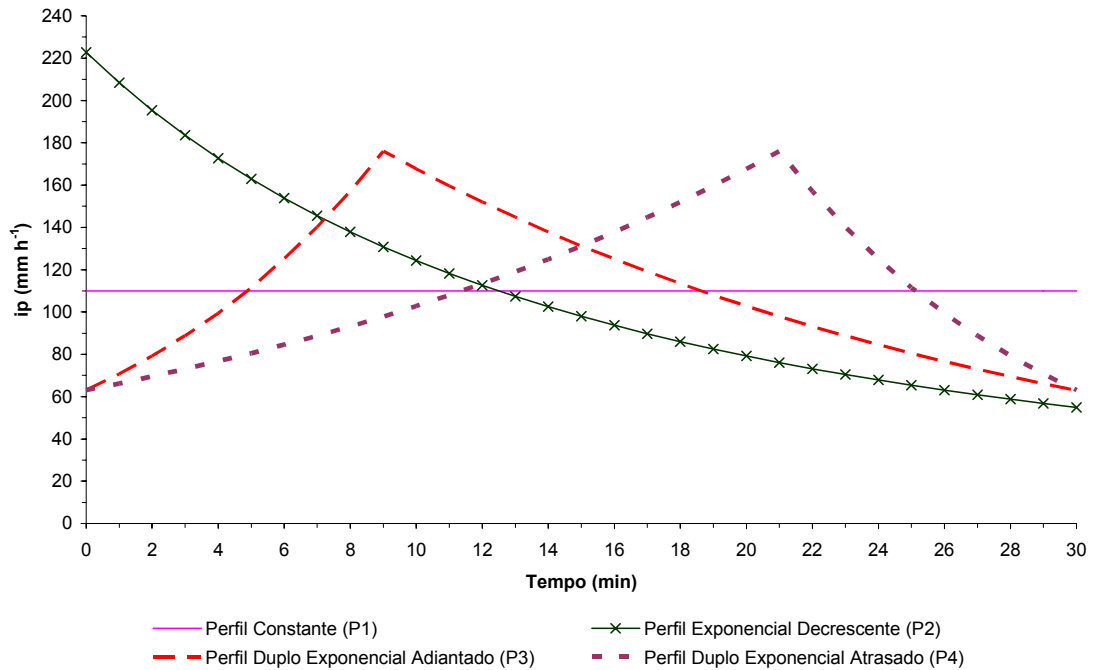


Figura 1. Perfis de precipitação utilizados no experimento.

### 3.2. Descrição do experimento

Para a verificação da influência dos quatro perfis de precipitação nas perdas de água e solo foram realizados experimentos em campo em condições de superfície com o solo descoberto, numa encosta situada na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV), cujo solo foi classificado como Cambissolo Háplico Tb distrófico, usando um simulador de chuvas do tipo pendular.

#### 3.2.1. Simulador de chuvas

O simulador de chuvas utilizado (Figura 2), desenvolvido no DEA/UFV, é similar ao descrito por Meyer e Harmon (1979), tendo cinco bicos VeeJet 80.100, oscilantes e dispostos linearmente, instalados a uma altura de 3 m da superfície do solo, trabalhando com pressão de serviço, conforme utilizada por Zeng et al. (2000), igual a 41,4 kPa.



Figura 2. Simulador de chuvas utilizado no experimento.

A intensidade e o perfil de precipitação foram controlados por um circuito analógico digital conectado a um microcomputador, conforme esquematizado na Figura 3. O sistema é controlado por meio de um programa computacional (Figura 4) desenvolvido em ambiente Delphi que possibilitou criar uma interface entre o computador e o circuito analógico digital.

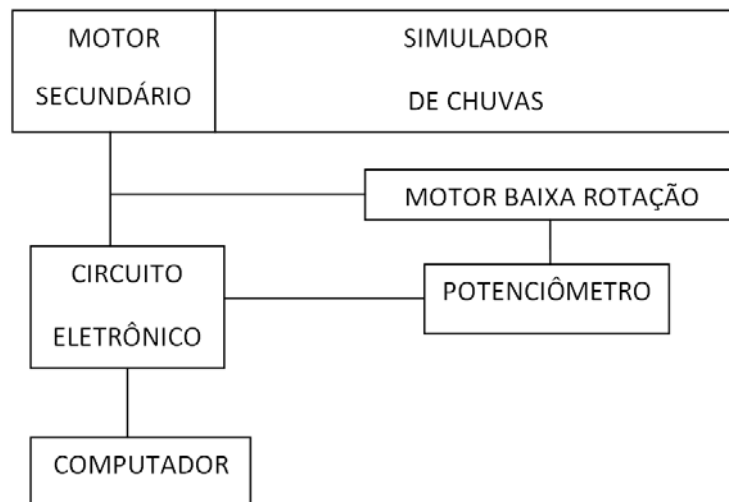


Figura 3. Esquema do controle computacional do simulador.

O programa envia um sinal ao circuito que aciona os dois motores ligados em paralelo, sendo um deles responsável pelo ajuste do ângulo de movimentação dos bicos (motor secundário) e o outro pelo monitoramento da

amplitude do percurso dos bicos (motor de baixa rotação), que é feito por meio de um potenciômetro.

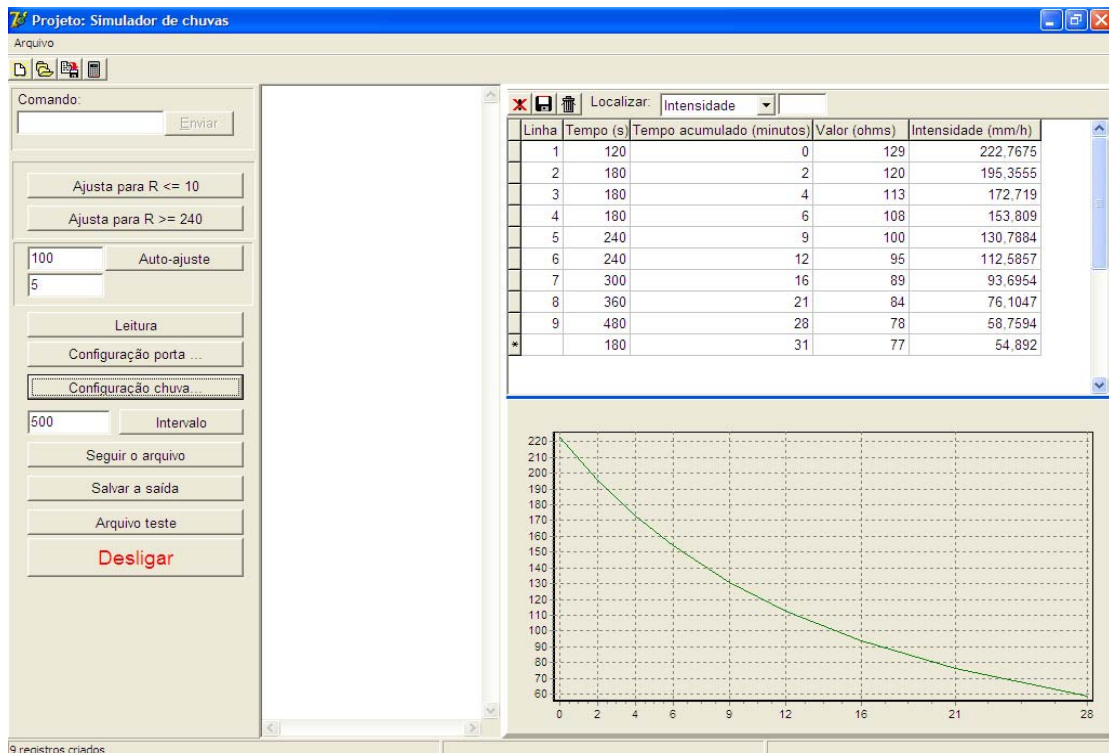


Figura 4. Interface do programa computacional para controle do simulador de chuvas.

Cada valor de resistência do potenciômetro indica uma determinada intensidade de precipitação, sendo o circuito acionado de acordo com os valores de resistência e tempo definidos a partir dos dados de entrada no software, e que é desligado ao atingir a posição desejada. O software permite a entrada de planilhas de dados e equações que descrevam o perfil de precipitação.

O simulador de chuvas foi instalado na área experimental e sob ele foram individualizadas quatro parcelas experimentais (Figura 2), as quais foram delimitadas por chapas metálicas com dimensões de 1,0 m de comprimento por 0,7 m de largura, cravadas no solo a 15 cm de profundidade, com a maior dimensão no sentido do declive. As calhas coletoras do escoamento superficial foram conectadas a um mangote direcionado no sentido da declividade do terreno, permitindo a condução da água e do solo aos recipientes de coleta (Figura 5).



Figura 5. Parcela experimental e calha coletora.

### 3.2.2. Calibração do simulador de chuvas

A relação entre intensidade de precipitação e resistência elétrica foi feita por meio de uma calibração prévia em cada parcela experimental, onde foi colocada uma calha para direcionar o volume precipitado aos reservatórios de coleta (Figura 6).



Figura 6. Estrutura utilizada para a calibração do simulador de chuvas na área experimental.

Uma vez definido o valor de resistência, chuvas simuladas foram aplicadas durante 10 minutos. Este procedimento foi repetido para as resistências compreendidas entre 80 e 130  $\Omega$ , com intervalos de 5  $\Omega$ . Com o volume coletado e o tempo de aplicação foi possível calcular a intensidade de precipitação média aplicada para cada valor de resistência adotado. A intensidade de precipitação foi calculada por:

$$i_p = (n_{t+1} - n_t) \frac{A_r}{A_c} 60 \quad (10)$$

em que

$i_p$  = intensidade de precipitação,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$n_{t+1}$  = altura do nível de água no reservatório de coleta no tempo  $t+1$  min,  
mm;

$n_t$  = altura do nível de água no reservatório de coleta no tempo  $t$  min,  
mm;

$A_r$  = área do reservatório de coleta,  $\text{mm}^2$ ; e

$A_c$  = área da calha,  $\text{mm}^2$ .

No Quadro 1 são apresentados os valores de resistência elétrica e suas respectivas intensidades de precipitação obtidos em uma das calibrações das parcelas experimentais.

Quadro 1. Valores de resistência elétrica (R) e intensidade de precipitação ( $i_p$ ), para uma das parcelas experimentais, obtidos após calibração do simulador de chuvas.

Resistência ( $\Omega$ )	Intensidade de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ )
80	57,2
85	62,3
90	68,6
95	74,4
100	85,8
105	120,1
110	137,3
115	171,6
120	200,2
125	234,5
130	280,7

### 3.2.3. Ajuste dos perfis de precipitação

Com os valores apresentados no Quadro 1 procedeu-se ao ajuste de equações para estimar a resistência elétrica associada aos valores de intensidade para cada perfil de precipitação proposto. Em seguida foram realizados testes para verificar a relação entre o perfil original e o perfil a ser aplicado.

Nas Figuras 7 a 10 estão representados os perfis originais e ajustados de acordo com as calibrações realizadas em uma das parcelas experimentais. No apêndice A são apresentados os Quadros 1A a 4A com os dados de calibração em campo.

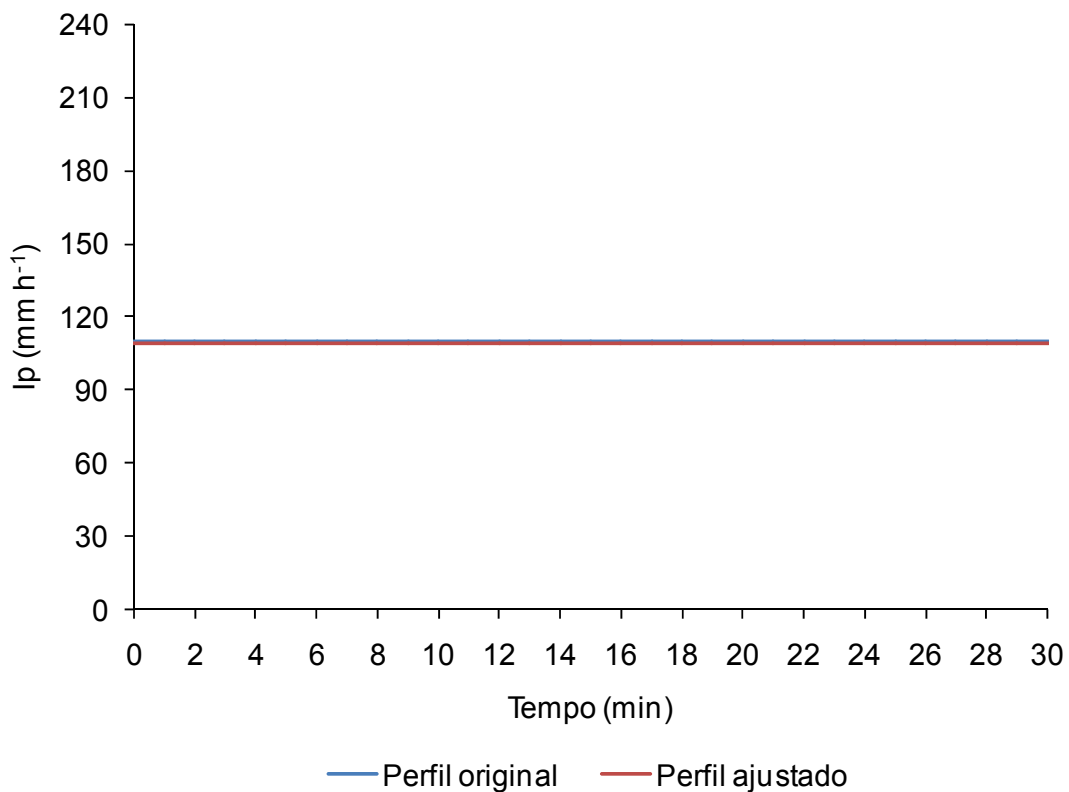


Figura 7. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação constante.

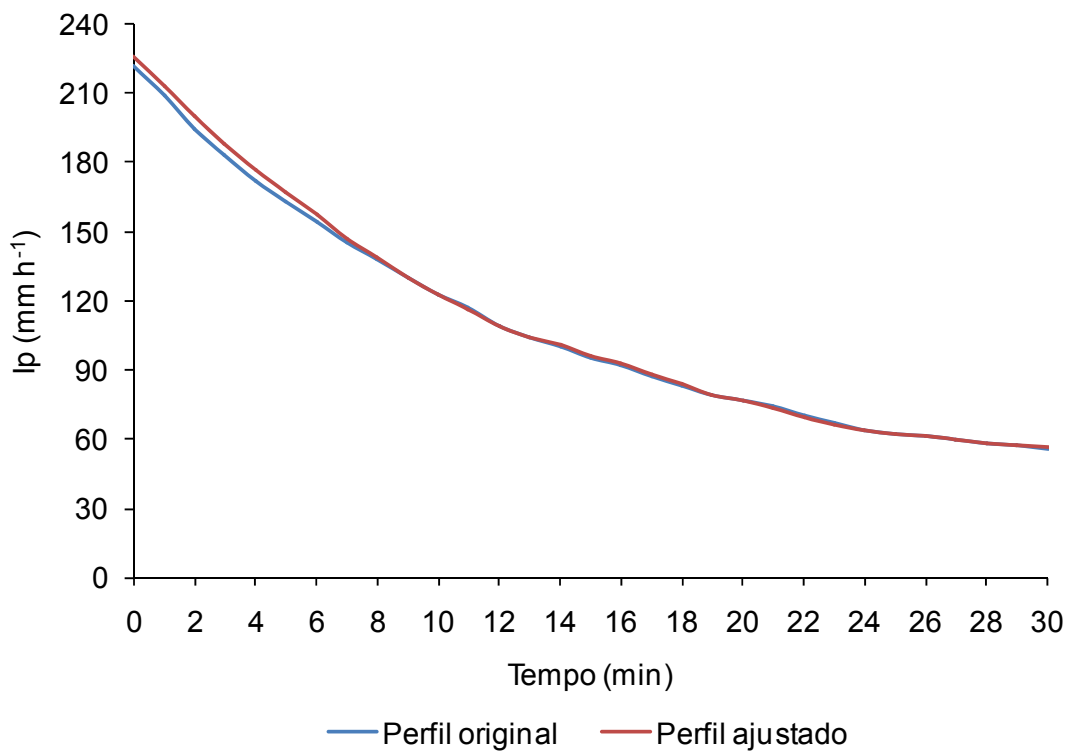


Figura 8. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação exponencial decrescente.

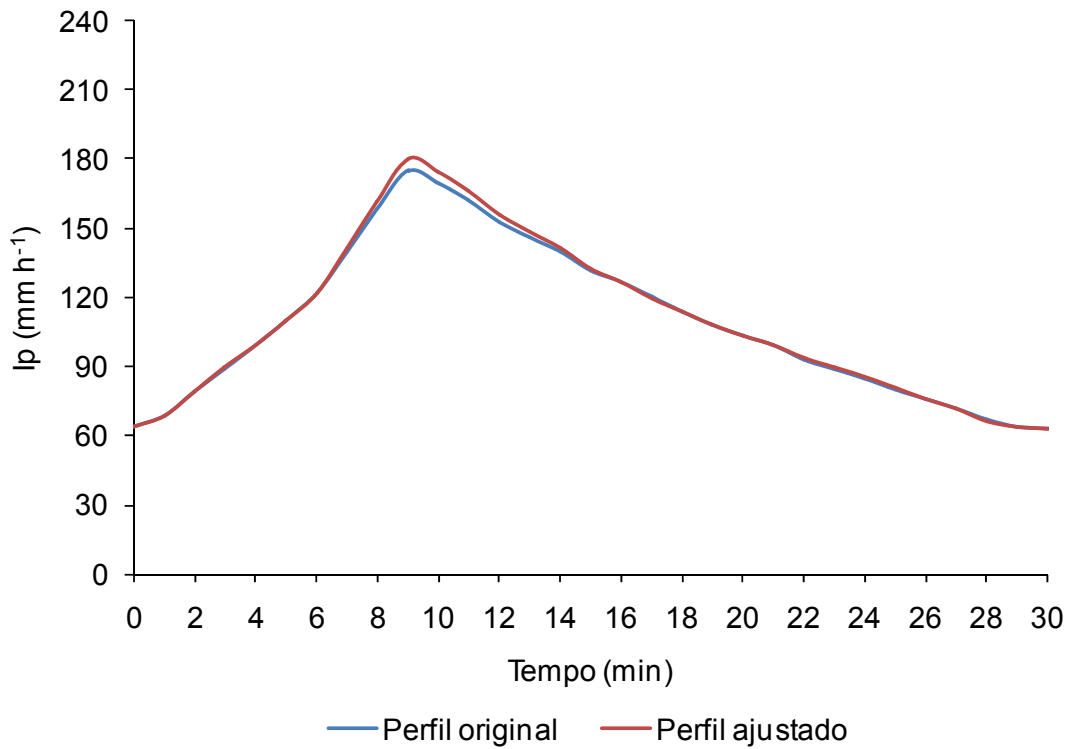


Figura 9. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

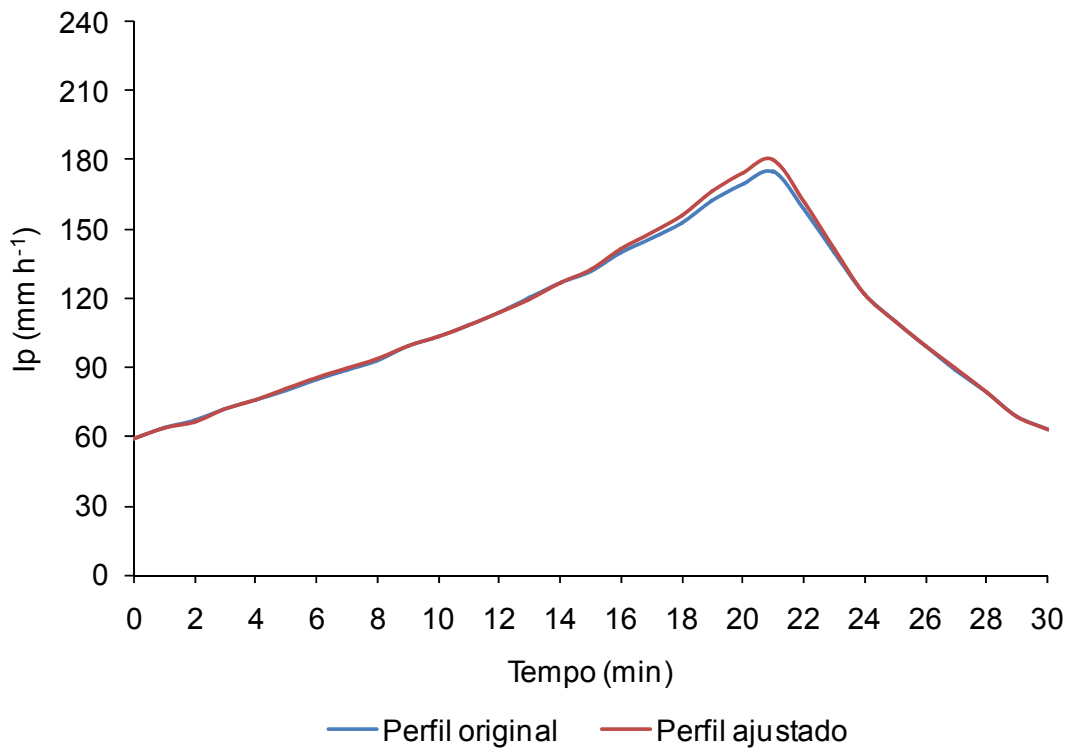


Figura 10. Perfil original e ajustado considerando o perfil de precipitação duplo exponencial atrasado.

### 3.2.4. Caracterização do solo

O solo da área experimental é classificado como Cambissolo Háplico Tb distrófico, sendo suas características físicas e químicas apresentadas nos Quadros 2 e 3, respectivamente. A área apresenta uma declividade média de 8,0%, com taxa de infiltração estável (Tie), obtida pelo método do infiltrômetro de anel, de 41 mm h<sup>-1</sup>.

Quadro 2. Características físicas do solo da área experimental

Horizonte	Prof. (cm)	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classificação textural
		----- % -----				
A	0 – 13	32,0	26,0	16,0	26,0	Textura média
AB	13 – 26	26,0	34,0	30,0	10,0	Arenosa
BA	26 – 48	24,0	36,0	16,0	24,0	Textura média
B1	48 – 75	19,0	27,0	22,0	32,0	Textura média
B2	75 - 100	16,0	42,0	20,0	22,0	Textura média

Fonte: Vieira (2003).

Quadro 3. Características químicas do solo da área experimental

Horizonte	MO	pH	P	K	Al	Ca	Mg	H+Al	Sb	CTC Total	V	m
		-----mg dm <sup>-3</sup> -----			-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			-----%--				
		dag kg <sup>-1</sup>										
A	2,64	5,0	4,3	27	1,1	0,7	0,3	3,06	1,07	4,13	26	51
AB	2,24	5,0	1,6	9	1,0	0,4	0,2	2,59	0,60	3,22	19	62
BA	2,12	5,0	2,9	12	0,8	0,4	0,2	2,05	0,63	2,68	24	56
B1	1,77	5,3	1,6	5	0,6	0,7	0,3	1,66	1,01	2,67	38	37
B2	1,66	4,9	1,9	5	0,5	0,4	0,2	1,66	0,61	2,27	27	45

Fonte: Vieira (2003).

### 3.3. Realização do experimento

Os tratamentos consistiram na simulação dos perfis de precipitação, descritos no item 3.1, em condições de solo descoberto e três condições de umidade inicial do solo, caracterizados neste trabalho como umidade baixa, intermediária e alta. Assim, cada tratamento foi definido pela combinação de um perfil de precipitação e da condição inicial de umidade do solo.

Para cada um dos tratamentos foram realizadas seis repetições, totalizando 72 eventos de chuva simulada, obedecendo a um delineamento inteiramente casualizado.

Visando homogeneizar as condições superficiais do solo, a área experimental foi preparada com uma aração e uma gradagem, sendo em seguida montada a estrutura para realização dos testes.

A realização do experimento consistiu inicialmente na aplicação dos tratamentos correspondentes à baixa umidade do solo, e reaplicados após 24 h e 48 h, correspondendo às condições de umidade do solo média e alta, respectivamente.

Durante as simulações os tratamentos foram aleatorizados, adotando-se o critério de se manter a aplicação do mesmo perfil de precipitação na mesma parcela experimental durante as três aplicações.

Após a realização das três aplicações era feito o revolvimento do solo a fim de evitar que os efeitos de uma aplicação interferissem nos resultados das repetições subseqüentes. Em seguida, a área era mantida em repouso por um período de tempo de aproximadamente 15 dias até o reinício dos testes, a fim de restabelecer as condições de umidade inicial do solo a um valor similar à primeira condição de aplicação.

### **3.3.1. Determinação das perdas de solo**

As perdas de solo foram determinadas pela coleta do solo transportado pelo escoamento superficial até a extremidade final da estrutura de coleta, na qual foi instalado um funil onde foi colocada uma manta sintética, previamente pesada (Figura 11), para possibilitar a retenção das partículas de solo transportadas durante a realização do teste.

A troca das mantas sintéticas foi realizada de dois em dois minutos, durante os 30 minutos de aplicação da precipitação. Ao final do teste, o solo junto com a manta sintética foi colocado para secar ao ar por aproximadamente dois dias, até atingir a umidade higroscópica, e então levados à estufa a 65° C por um período de 48 horas. As perdas de solo obtidas a cada minuto de aplicação das precipitações foram determinadas por:

$$P_s = \frac{(P_f - P_i)}{2} \quad (11)$$

em que

$P_s$  = perda de solo,  $g \text{ min}^{-1}$ ;

$P_f$  = peso final da manta sintética com solo, g; e

$P_i$  = peso inicial da manta sintética, g.



Figura 11. Estrutura de coleta de água e solo.

### 3.3.2. Determinação das perdas de água

As perdas de água decorrentes do escoamento superficial foram coletadas em dois reservatórios de acumulação construídos com tubos de PVC e que estavam interconectados, um com 150 mm e outro com 250 mm de diâmetro, sendo o volume total igual a 67 L. No primeiro reservatório foi apoiado o funil com a manta sintética e no segundo foi instalado um Thalimedes, que permitiu a medição da altura do nível da água em intervalos de um minuto (Figura 11).

De posse dos valores medidos das perdas de água, puderam-se determinar as taxas de infiltração pela diferença entre a intensidade de precipitação aplicada no intervalo e a taxa de escoamento superficial. Além disso, foi possível calcular o coeficiente de escoamento superficial (C), obtido pela relação entre a lâmina total escoada e a lâmina total precipitada.

### **3.4. Análise estatística**

A partir dos dados coletados foi possível elaborar gráficos que relacionaram as taxas de perdas de água e solo em função do tempo de aplicação, o que permitiu calcular as perdas totais de água e solo. Os valores totais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) aplicando-se o teste F e fazendo-se a comparação das médias dos tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Primeira e segunda aplicações

Durante a primeira aplicação, que consistiu na simulação de chuvas em solos com baixa umidade inicial, não foi observada a ocorrência de escoamento superficial e, conseqüentemente, não houve perdas de solo em nenhuma das aplicações correspondentes aos quatro perfis de precipitação estudados. Tal comportamento se deve ao fato de que a mobilização do solo, decorrente do seu preparo, e a sua baixa umidade inicial promoveram uma alta capacidade de infiltração, devido principalmente à elevada condutividade hidráulica e ao baixo potencial matricial referente à umidade inicial do solo. Assim, em nenhum momento durante os testes a intensidade de precipitação foi superior à capacidade de infiltração da água no solo.

Embora a primeira aplicação, à qual esteve associada uma erosividade de  $1.710 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ , não tenha produzido escoamento superficial, esta promoveu o aumento da umidade do solo, a quebra de agregados e o encrostamento da superfície do solo, com conseqüente redução da condutividade hidráulica da camada superficial e do gradiente hidráulico, força responsável pelo movimento de água no solo. Esta condição pode ser evidenciada pela comparação das Figuras 12a e 12b, correspondentes às condições anterior e posterior, respectivamente, à primeira aplicação da

precipitação nas parcelas experimentais. Embora a Figura 12 represente a condição relativa ao perfil duplo exponencial adiantado, comportamento similar foi também evidenciado para os demais perfis, uma vez que a erosividade associada a cada um dos quatro perfis de precipitação foi igual.

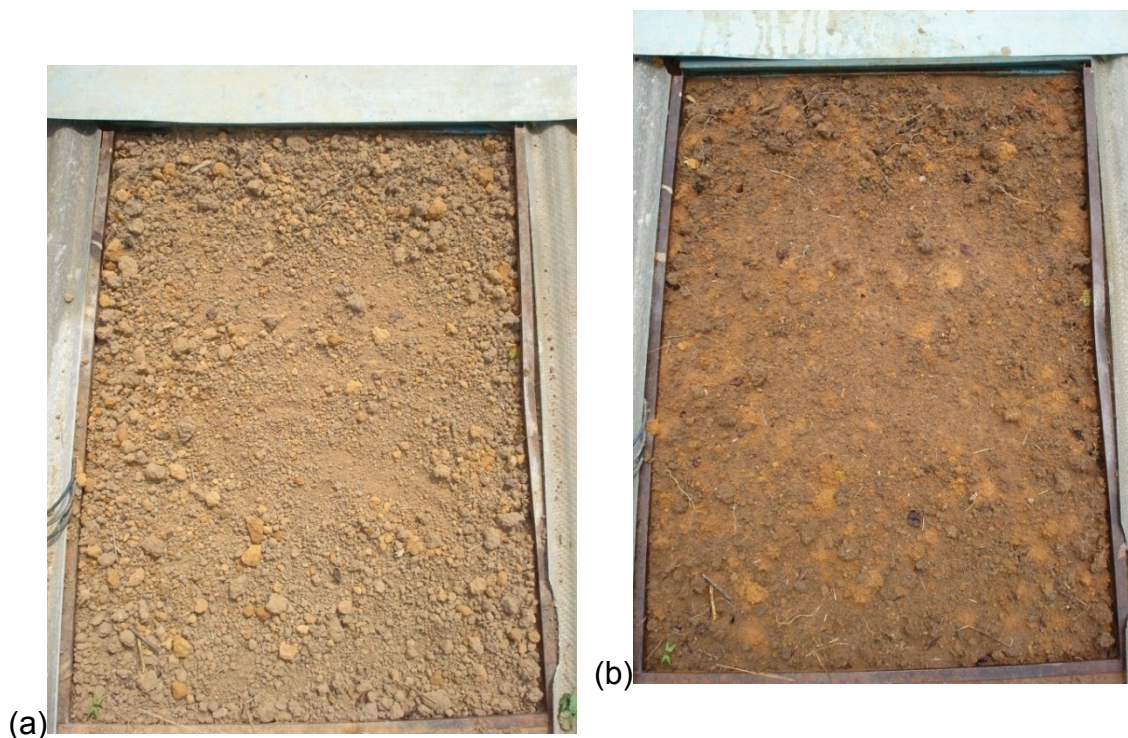


Figura 12. Condições da superfície do solo antes (a), e depois da primeira aplicação (b) para o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os valores médios e os desvios-padrão das perdas de água e solo, respectivamente, referentes a seis repetições realizadas na segunda aplicação. Os resultados obtidos pela análise de variância são apresentados na Tabela 3.

Tabela 1. Médias e desvios-padrão para as perdas de água referentes à segunda aplicação e considerando seis repetições

Perfil	Perdas de água (mm)			
	Constante	Exponencial	Adiantado	Atrasado
Média	9,4	21,6	20,9	13,3
Desvio-padrão	7,6	9,0	12,8	12,9

Tabela 2. Médias e desvios-padrão para as perdas de solo referentes à segunda aplicação e considerando seis repetições

Perfil	Perdas de solo (g)			
	Constante	Exponencial	Adiantado	Atrasado
Média	8,4	73,9	116,8	76,8
Desvio-padrão	14,7	104,6	169,1	140,8

Tabela 3. Análise de variância e coeficientes de variação para as perdas de água e de solo referentes à segunda aplicação e considerando seis repetições

Fonte de variação	GL	Soma de Quadrados	
		Perdas de água	Perdas de solo
Perfil	3	212,0 <sup>ns</sup>	12.090,7 <sup>ns</sup>
Erro	20	117,2	14.900,2
CV(%)		66,5	177,0

<sup>ns</sup> não significativo.

Apesar das expressivas diferenças observadas entre as médias de perdas de água e de solo, chegando, no caso das perdas de solo evidenciadas para o perfil duplo exponencial adiantado a superarem em 14 vezes as perdas correspondentes ao perfil constante, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas para os tratamentos avaliados. Esse comportamento pode ser justificado pelos altos desvios-padrão e coeficientes de variação obtidos, acarretando intervalos de confiança muito amplos. Por isso, embora diferenças físicas expressivas tenham sido evidenciadas, não ocorreram diferenças estatisticamente significativas. Obviamente que os resultados não comprovam igualdade, ou até mesmo, similaridade entre os resultados obtidos com os diversos tratamentos, mas apenas que não existe comprovação estatística para estas diferenças, o que é uma afirmação bem mais fraca (PIMENTEL GOMES, 1990).

A segunda aplicação, a qual estava associada uma erosividade acumulada de  $3.420 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ , promoveu o aumento da umidade do solo e do encrostamento superficial em relação à primeira aplicação, com conseqüente redução da condutividade hidráulica e elevação do potencial matricial de água no solo, provocando a diminuição da capacidade de infiltração de água no solo.

A Figura 13a ilustra a condição da superfície do solo da parcela experimental 24 h após a primeira aplicação e a Figura 13b a condição encontrada logo após o término da segunda aplicação do perfil duplo exponencial adiantado.

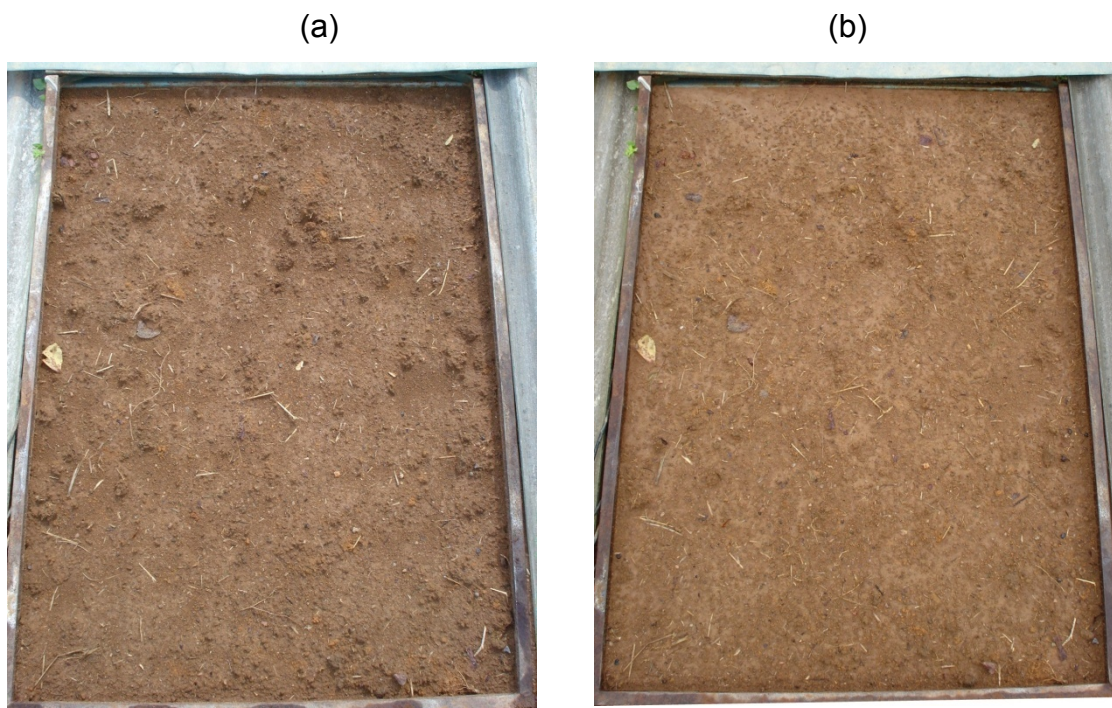


Figura 13. Condições da superfície do solo antes (a), e depois da segunda aplicação (b) para o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

## 4.2 Terceira aplicação

### 4.2.1 Perdas de água

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios e os desvios-padrão das perdas de água referentes às seis repetições para a terceira aplicação, e na Tabela 5 são apresentados os resultados da análise de variância.

Tabela 4. Médias e desvios-padrão para as perdas de água referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições

Perfil	Perdas de água (mm)			
	Constante	Exponencial	Adiantado	Atrasado
Média	20,1	40,0	33,4	35,6
Desvio-padrão	6,7	8,4	12,2	7,1

Tabela 5. Análise de variância e coeficientes de variação para as perdas de água referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições

Fonte de variação	GL	Soma de Quadrados
		Perdas de água
Perfil	3	443,1**
Erro	20	78,6
CV(%)		27,5

\*\* significativo a 1%.

Observa-se na Tabela 4 grandes diferenças entre os valores médios de perdas de água entre os tratamentos avaliados na terceira aplicação, chegando estes valores a 2,0; 1,8 e 1,7 vezes maior em relação ao perfil constante, para os perfis exponencial negativo, duplo exponencial atrasado e adiantado, respectivamente. Os resultados obtidos pela análise estatística indicam, para esta aplicação, diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ao nível de 1% de significância. Tal comportamento pode ser atribuído à redução expressiva do coeficiente de variação em relação à segunda aplicação. Constatadas as diferenças entre os tratamentos, estes foram submetidos ao teste de Tukey sendo os resultados apresentados na Figura 14.

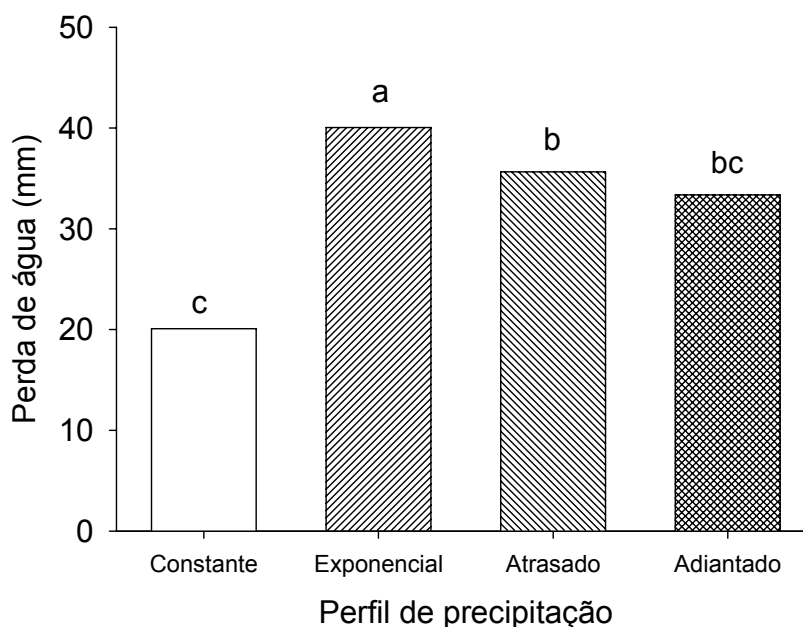


Figura 14. Teste de Tukey para as médias de perdas de água referentes às seis repetições realizadas na terceira aplicação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 1% de significância.

As maiores perdas médias de água são referentes ao perfil exponencial negativo (40,0 mm), que diferiu estatisticamente, pelo teste de Tukey (1%), dos demais perfis. Os perfis duplo exponencial atrasado (35,6 mm) e adiantado (33,4 mm) não diferiram estatisticamente entre si, enquanto que o perfil constante (20,1 mm), que apresentou o menor valor, diferiu estatisticamente do perfil duplo exponencial atrasado, mas não diferiu do perfil duplo exponencial adiantado.

A aplicação sequencial de três precipitações iguais a 55 mm, que representaram uma erosividade de  $5.130 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ , fez com que o encrostamento superficial formado deixasse de apresentar variações expressivas ao longo do teste, o que também refletiu no comportamento da infiltração da água no solo, tendo sido esta também afetada pela maior profundidade da frente de umedecimento.

Na Figura 15 está representada uma condição relativa ao perfil duplo exponencial adiantado, sendo que a Figura 15a ilustra as condições da superfície do solo da parcela experimental 24 h após a segunda aplicação, e a Figura 15b logo após a terceira aplicação.

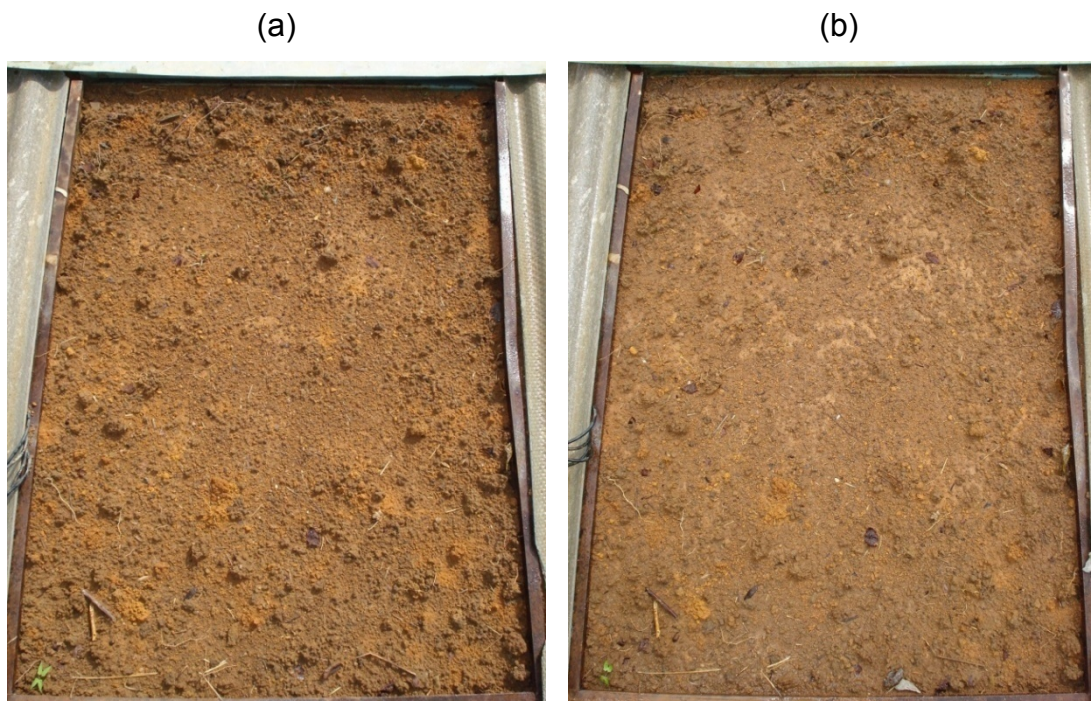


Figura 15. Condições da superfície do solo antes (a), e depois da terceira aplicação (b) para o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado.

Flanagan et al. (1988) avaliaram os efeitos de diferentes perfis de precipitação na infiltração, no escoamento e nas perdas de solo. Os autores utilizaram seis perfis de precipitação que tinham a duração de 1 h e diferiram pelo tempo de ocorrência da intensidade máxima ao longo do tempo de aplicação. As maiores perdas médias de água foram obtidas para os perfis com intensidade máxima ocorrendo no início e no fim das aplicações, enquanto que as menores perdas foram obtidas para os perfis de precipitação com pico ocorrendo aos 20 min, podendo estes últimos serem comparados ao perfil duplo exponencial adiantado. Esses resultados, à princípio, divergem dos obtidos neste trabalho, mas é importante ressaltar que cinco dos perfis utilizados por Flanagan et al. (1988) apresentaram a mesma intensidade máxima. Por isso, é provável que os resultados das perdas de água seriam similares se as intensidades máximas dos perfis exponencial e duplo exponencial atrasado fossem as mesmas.

Neste mesmo trabalho, Flanagan et al. (1988) apresentaram resultados referentes ao efeito de aplicações de chuvas sucessivas, que podem ser diferenciadas em função do perfil de precipitação previamente aplicado. Ao aplicar um perfil de precipitação correspondente ao perfil duplo exponencial adiantado em seguida à aplicação dos demais perfis, ou seja, em solo úmido, foram obtidas as menores perdas de solo nas parcelas as quais tinham sido previamente aplicados o perfil exponencial decrescente e duplo exponencial atrasado, que, segundo o autor, este resultado pode ser devido ao maior encrostamento superficial formado nestas parcelas. Os autores também citam que, devido à formação do encrostamento na primeira aplicação, as taxas de infiltração nas aplicações subseqüentes, com solo úmido, apresentaram um decréscimo, conforme esperado.

Eltz et al. (2001) avaliaram as perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico abrupto submetido a quatro diferentes perfis de precipitação que apresentaram duração de 60 min e total precipitado de 35 mm. Apesar dos maiores valores médios de perdas de água terem sido obtidos para o perfil atrasado, não foram evidenciadas diferenças estatisticamente significativas (5%) entre os perfis com intensidade variada, havendo diferenças significativas apenas destes em relação ao perfil constante, que foi aproximadamente duas vezes.

Silva e Rossoni (2004) realizaram testes em um canal de solo para avaliar as perdas de solo e água utilizando os mesmos perfis de precipitação propostos neste trabalho, com a mesma duração e lâmina total aplicada. Foram realizadas quatro aplicações sucessivas do mesmo perfil, em intervalos de 15 min entre as aplicações, e os resultados obtidos mostraram que não houve diferenças estatísticas (5%) para as perdas de água entre os tratamentos, como também entre as sequências das aplicações. As maiores perdas médias de água foram referentes ao perfil duplo exponencial atrasado (36,4 mm), superando os perfis constante, exponencial decrescente e o duplo exponencial adiantado em 14,2%, 5,2% e 6,8%, respectivamente.

Parsons e Stone (2006) avaliaram cinco diferentes perfis de precipitação classificados como crescente, decrescente, côncavo, convexo e constante, e que tinham duração de 30 min e lâmina aplicada de 45 mm. Apesar das grandes variações de intensidade observadas entre estes perfis, os autores não encontraram diferenças significativas para as perdas de água.

Na Figura 16 são apresentados o perfil de precipitação, as taxas de infiltração e de perda de água correspondentes à terceira aplicação do perfil constante, considerando as seis repetições realizadas. Este perfil apresentou as menores perdas de água, com coeficiente de escoamento igual a 0,36 e, conseqüentemente, as maiores taxas de infiltração entre todos os perfis considerados. O processo de infiltração foi governado pelo solo praticamente desde o início (tempo de empoçamento inferior a um minuto), evidenciando-se um declínio progressivo da taxa de infiltração decorrente tanto do aumento da lâmina de água infiltrada como pela formação do encrostamento da camada superficial. Neste caso não se chegou a evidenciar uma tendência de estabilização da taxa de infiltração, tendo esta atingido, ao final do teste, valor de  $51 \text{ mm h}^{-1}$ , o que fez com que a taxa de escoamento apresentasse uma tendência de aumento até o fim do ensaio. Os valores das taxas de infiltração obtidos neste teste foram superiores aos obtidos por outros autores, que realizaram testes nesta mesma área experimental.

Zonta (2007) realizou testes com simuladores de chuvas em parcelas experimentais descobertas aplicando chuvas com intensidade constante de  $105 \text{ mm h}^{-1}$ , e obteve uma taxa de infiltração estável média de  $20 \text{ mm h}^{-1}$ , mesmo para uma menor lâmina de precipitação aplicada. Vieira (2003) obteve

valores de taxa de infiltração estável de  $41 \text{ mm h}^{-1}$  utilizando um infiltrômetro de anel, o qual não impõe um processo de encrostamento tão intenso como aquele associado ao uso do simulador de chuvas.

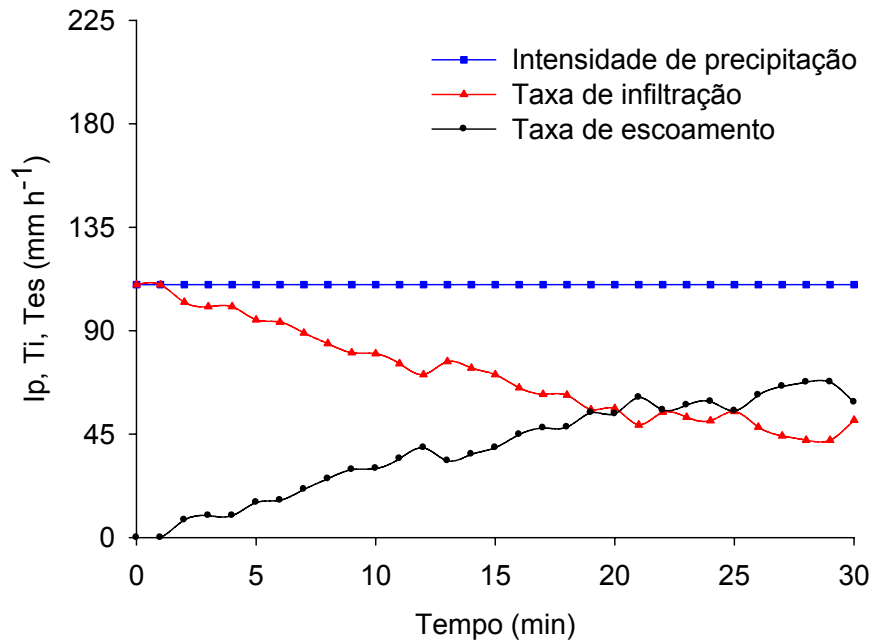


Figura 16. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil constante na terceira aplicação e considerando seis repetições.

Na Figura 17 são apresentadas as intensidades de precipitação, as taxas médias de infiltração e de escoamento superficial referentes ao perfil de precipitação exponencial negativo. O processo de infiltração é governado, desde o início, pelo solo, tal como no caso do perfil constante. A taxa de infiltração decresceu rapidamente em um curto intervalo de tempo após o início da aplicação, sendo que, após 10 min de aplicação de água, a taxa de infiltração tendeu a um valor aproximadamente constante e igual a  $15 \text{ mm h}^{-1}$ . Este rápido declínio da taxa de infiltração está associado ao grande volume infiltrado desde a primeira aplicação e ao encrostamento superficial associado a este.

Devido ao rápido declínio da taxa de infiltração evidenciado no início do teste, a taxa de escoamento superficial apresentou um aumento expressivo no início da aplicação. A partir do tempo de 2 min passam a ocorrer decréscimos na taxa de escoamento, tendo em vista que, embora a taxa de infiltração esteja sofrendo uma pequena redução com o tempo, a intensidade de precipitação

apresenta uma redução mais acentuada que a da infiltração. Evidencia-se que, neste tratamento, grande parte da lâmina precipitada foi convertida em escoamento, sendo o coeficiente de escoamento superficial igual a 0,73.

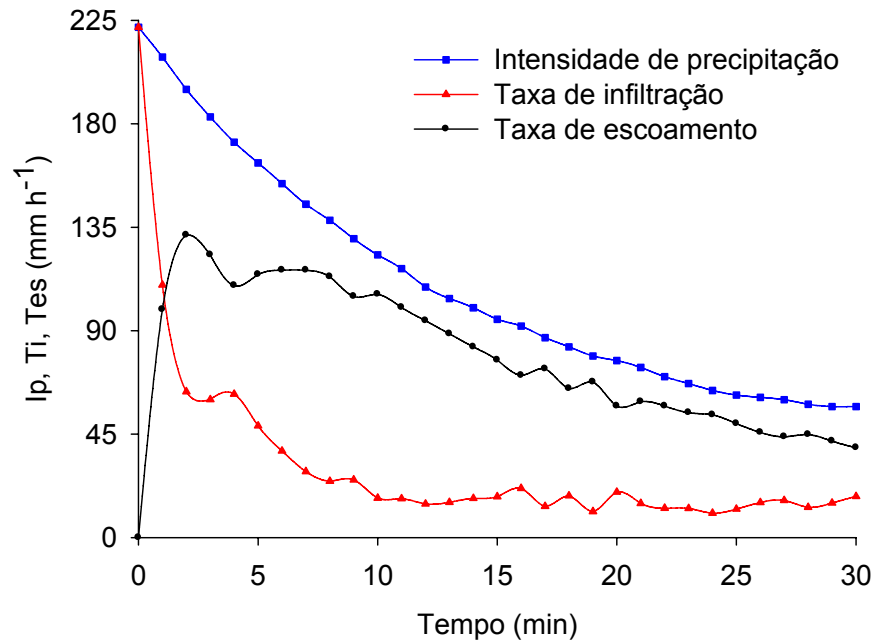


Figura 17. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil exponencial negativo na terceira aplicação e considerando seis repetições.

As intensidades de precipitação, as taxas médias de infiltração e de escoamento superficial referentes ao perfil de precipitação duplo exponencial adiantado são apresentadas na Figura 18. Embora o processo de infiltração tenha sido governado pelo solo desde o início, foi observado, no intervalo compreendido entre 3 e 8 min, um aumento da taxa de infiltração, comportamento não esperado, uma vez que ao longo do ensaio o processo de encrostamento foi progressivo, havendo assim uma redução da capacidade de infiltração em função do aumento da lâmina de água infiltrada no solo. Após esse tempo, a infiltração passou a apresentar uma taxa de decrescimento, conforme era esperado e evidenciado nos demais testes, tendendo a um valor similar aquele obtido para o perfil exponencial negativo, em torno de 15 mm h<sup>-1</sup>. Devido às baixas taxas de infiltração observadas foram evidenciadas altas taxas de escoamento, sendo o coeficiente de escoamento superficial para este tratamento igual a 0,61.

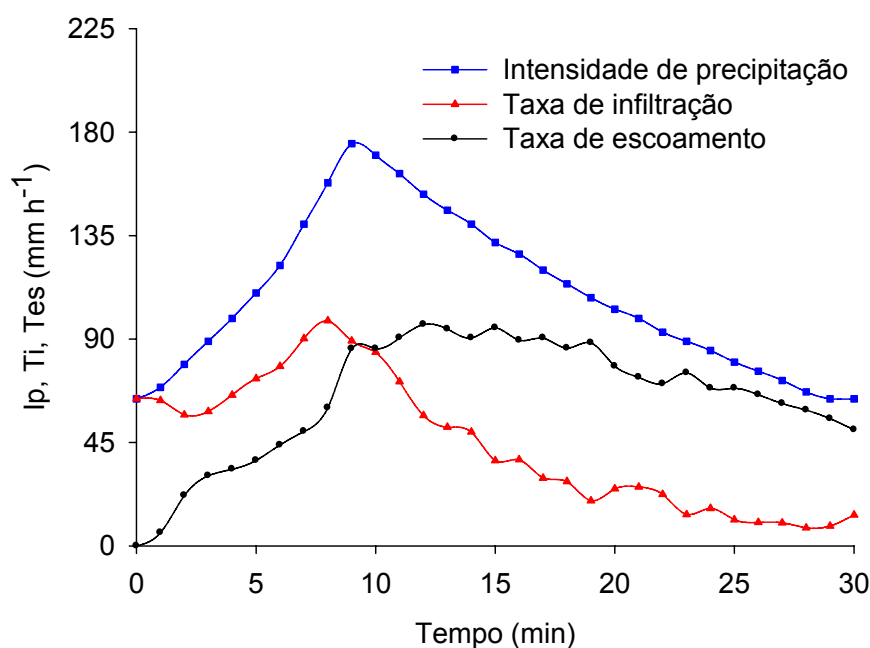


Figura 18. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial adiantado na terceira aplicação e considerando seis repetições.

Na Figura 19 são apresentados os resultados referentes ao perfil duplo exponencial atrasado. Tal como nos demais perfis, constatou-se que o processo de infiltração foi governado pelo solo desde o início dos ensaios. Evidenciaram-se reduções expressivas das taxas de infiltração até o tempo de 16 min, a partir do qual se observa uma leve ascensão até o tempo próximo ao pico de intensidade, sendo que a partir deste tempo, novamente reduções das taxas foram observadas até o fim das aplicações. De modo semelhante ao perfil anterior, se observa, a partir do pico de intensidade, que grande parte da lâmina aplicada é convertida em escoamento, sendo o coeficiente de escoamento superficial obtido para este perfil igual a 0,65. Nos minutos finais a taxa de infiltração foi de aproximadamente 15 mm h<sup>-1</sup>, valor similar ao observado para os perfis exponencial negativo e duplo exponencial adiantado.

Na Figura 20 é apresentada a variação da taxa de escoamento superficial em função da lâmina aplicada acumulada para os quatro perfis de precipitação avaliados durante a terceira aplicação.

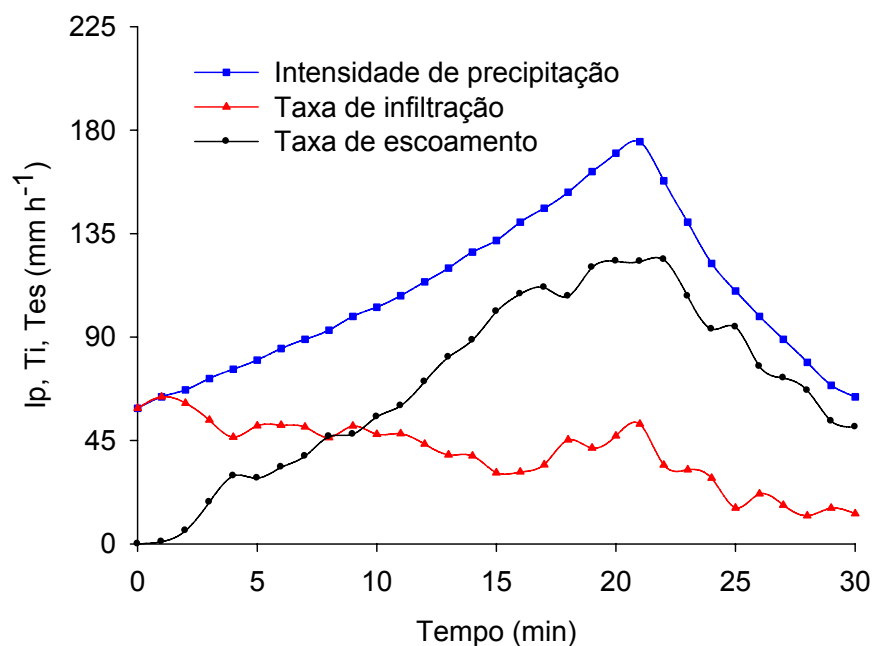


Figura 19. Intensidade de precipitação, taxas médias de infiltração e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial atrasado na terceira aplicação e considerando seis repetições.

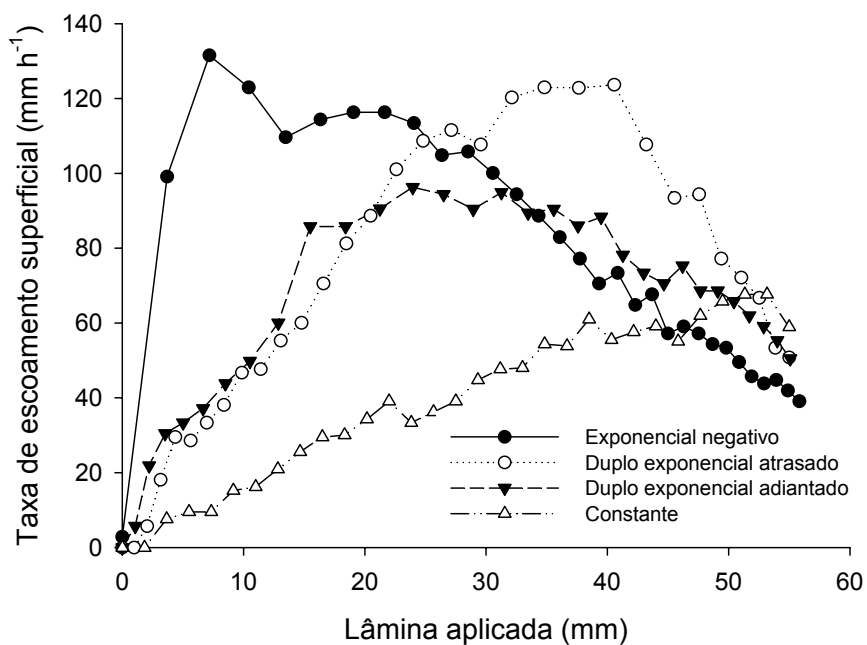


Figura 20. Taxas médias de escoamento superficial em função da lâmina aplicada acumulada para os diferentes perfis de precipitação, referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições.

Os perfis apresentaram respostas bastante diferenciadas conforme a proporção da lâmina aplicada e, conseqüentemente, da energia associada a esta lâmina. Observa-se que os três perfis com intensidade variada apresentaram comportamento da taxa de escoamento similar à curva dos perfis de precipitação, enquanto o perfil constante foi o único perfil que apresentou nítida tendência de crescimento progressivo ao longo do tempo, e maior desigualdade em relação ao perfil de precipitação. Para este perfil, mesmo que tenham sido evidenciadas anormalidades nas taxas de infiltração, foi o que ao final do ensaio ainda apresentava as maiores taxas de escoamento, tendo em vista o fato de que ao final dos testes era o que apresentava as maiores intensidades de precipitação.

Enquanto para o perfil constante o escoamento começou com 3,6 mm de lâmina aplicada, havendo uma tendência de crescimento progressivo deste com o tempo, para os demais perfis houve uma conversão maior da precipitação em escoamento já desde o início do processo, sendo este mais acentuado para o perfil exponencial negativo e menos acentuado para os perfis duplo exponenciais adiantado e atrasado. Com o aumento da lâmina total aplicada foi observada uma tendência de convergência entre os valores de escoamento superficial para todos os perfis, atingindo, para a lâmina aplicada de 55 mm, valores entre 39 e 59 mm h<sup>-1</sup>.

#### 4.2.2 Perdas de solo

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios e os desvios-padrão das perdas de solo e na Tabela 7 os resultados da análise de variância, ambos referentes às seis repetições realizadas durante a terceira aplicação.

Tabela 6. Médias e desvios-padrão para as perdas de solo referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições

Perfil	Perdas de solo (g)			
	Constante	Exponencial	Adiantado	Atrasado
Média	28,9	335,3	213,3	258,1
Desvios-padrão	42,1	225,9	241,8	144,5

Tabela 7. Análise de variância e coeficientes de variação para as perdas de solo referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições

Fonte de variação	GL	Soma de Quadrados
		Perdas de solo
Perfil	3	101.644,0*
Erro	20	33.032,0
CV(%)		87,0

\* significativo a 5%.

Observa-se na Tabela 6 grandes diferenças nos valores médios de perdas de solo entre os tratamentos avaliados nesta aplicação, chegando estes valores a serem 11,6; 8,9 e 7,4 vezes maiores em relação aos obtidos para o perfil constante, para os perfis exponencial negativo, duplo exponencial atrasado e adiantado, respectivamente.

Embora tenham sido constatados nesta aplicação aumentos expressivos dos desvios-padrão para as perdas de solo em relação à segunda aplicação, ainda assim foram obtidas diferenças significativas ao nível de 5% entre os tratamentos, diferentemente do ocorrido para os dados de perdas de água. Esses resultados podem ser atribuídos à redução do coeficiente de variação (CV%), como apresentado na tabela da análise de variância.

De acordo com o resultado do teste de Tukey (5%), conforme apresentado na Figura 21, os maiores valores observados foram para o perfil de precipitação exponencial (335,3 g), que diferiu estatisticamente dos demais perfis. Os valores médios de perdas de solo obtidos para os perfis duplo exponencial adiantado (213,3 g) e atrasado (258,1 g) não diferiram estatisticamente entre si, mas diferiram dos perfis exponencial negativo e constante, sendo este último o que apresentou menor perda média de solo (28,9 g).

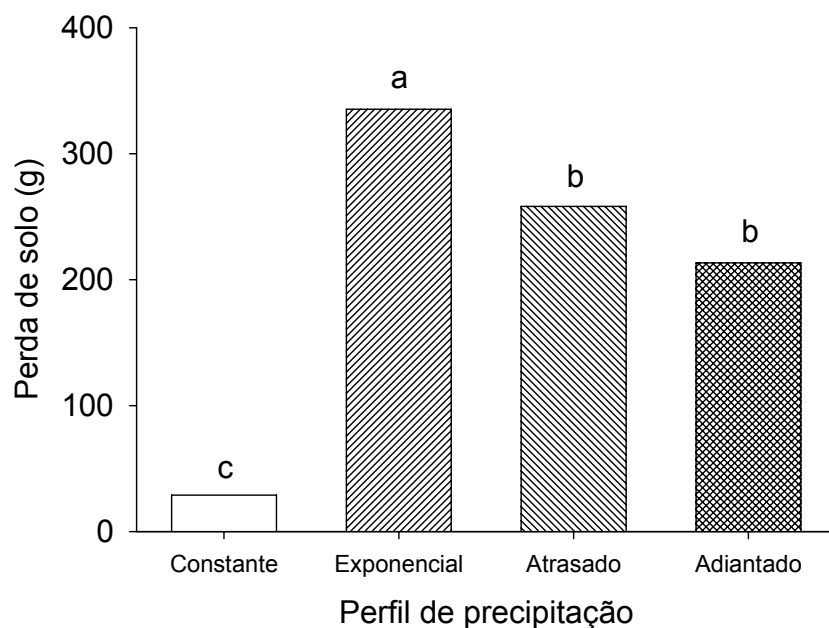


Figura 21. Teste de Tukey para as médias de perdas de solo referentes às seis repetições realizadas na terceira aplicação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de significância.

Eltz et al. (2001) também encontraram resultados em que as menores perdas de solo foram obtidas para o perfil de precipitação com intensidade constante ( $35 \text{ mm h}^{-1}$ ), sendo estas cerca de 3,5 vezes menores que as correspondentes ao perfil atrasado, que apresentou o maior valor, e que diferiram estatisticamente entre si e dos perfis intermediário e avançado, sendo que estes últimos não apresentaram diferenças estatísticas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos por Flanagan et al. (1988) indicam diferenças significativas ao nível de 5% para as perdas de solo entre os perfis de precipitação estudados em condições do solo com baixa umidade inicial. As maiores perdas médias foram obtidas para os perfis com intensidade máxima no início e no fim das aplicações, e que diferiram estatisticamente entre si. As menores perdas médias de solo foram obtidas para os perfis de precipitação com intensidade máxima de  $125 \text{ mm h}^{-1}$  ocorrendo aos 20 min de aplicação que diferiu estatisticamente dos demais perfis.

Silva e Rossoni (2004) obtiveram resultados que indicam um incremento acentuado da taxas de escoamento superficial e taxas de perdas de solo da primeira para a segunda aplicação em todos os perfis de precipitação

estudados, no entanto constataram que para as aplicações subseqüentes a variação foi pouco expressiva, não tendo sido obtidas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ao nível de 5%. Os autores concluíram que o perfil duplo exponencial atrasado foi o que apresentou as maiores perdas médias de solo, que foram 22,4%, 25,9% e 16,6% superiores aos perfis constante, exponencial decrescente e duplo exponencial adiantado, respectivamente.

O comportamento evidenciado para cada um dos perfis de precipitação em termos de perdas de solo é decorrente de dois principais componentes associados ao processo erosivo, que são a erosividade das chuvas, que é o principal agente responsável pela liberação de partículas, e o escoamento superficial, principal agente de transporte das partículas de solo. A ocorrência de perdas de solo depende diretamente da quantidade de material liberado pelo impacto das gotas e pela capacidade do escoamento superficial em transportá-los (MORGAN, 2005). Na Figura 22 é apresentada a variação da taxa de perdas de solo em função da lâmina aplicada para os diferentes perfis de precipitação avaliados.

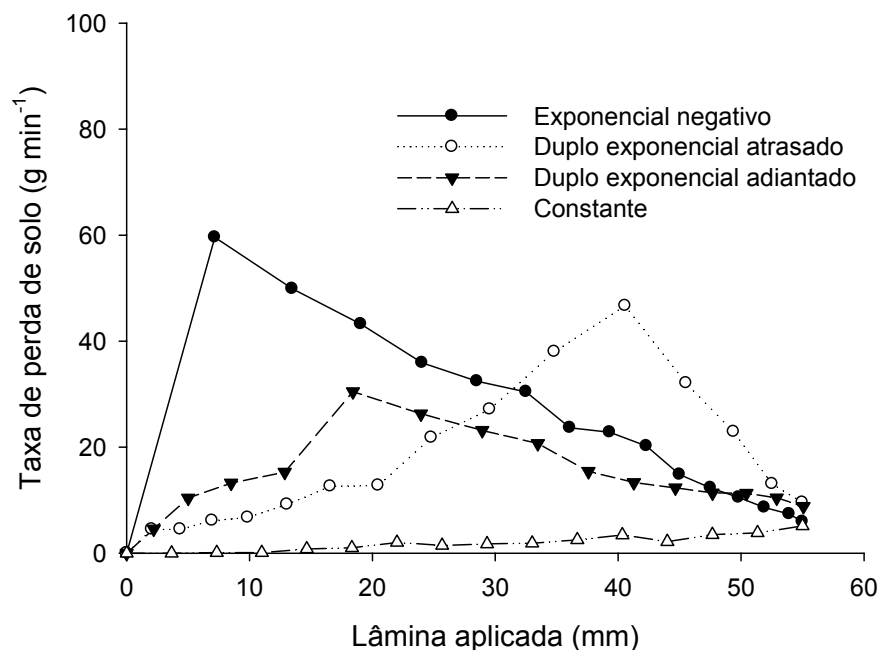


Figura 22. Taxas de perdas de solo em função da lâmina total aplicada acumulada para os diferentes perfis de precipitação, referentes à terceira aplicação e considerando seis repetições.

De forma semelhante às perdas de água, são observadas respostas bastante diferenciadas em termos de taxas de perdas de solo em função da lâmina aplicada. Observa-se, também, que os três perfis com intensidade variada apresentaram comportamento da taxa de perdas de solo similar à curva dos perfis de precipitação, e que o perfil constante foi o único que apresentou uma tendência de crescimento progressivo ao longo do tempo e maior desigualdade em relação ao perfil de precipitação.

Os perfis de precipitação exponencial negativo, duplo exponencial adiantado e duplo exponencial atrasado apresentaram elevação das taxas de perdas de solo associadas a pequenas lâminas aplicadas, enquanto para o perfil constante os valores das taxas de perdas de solo se elevaram somente a partir de uma maior lâmina aplicada.

Enquanto para o perfil constante o escoamento superficial atingiu energia necessária para o transporte de sedimentos somente a partir de uma lâmina aplicada de 11 mm, e a partir desse valor houve uma tendência de crescimento progressivo deste com o tempo, para os demais perfis foi observada a ocorrência de escoamento com energia suficiente para o desprendimento e transporte de sedimentos já desde o início do processo. Este comportamento foi mais acentuado para o perfil exponencial negativo e menos acentuado para os perfis duplo exponenciais adiantado e atrasado, respectivamente.

O perfil exponencial negativo foi o que apresentou maior taxa de perdas de solo associadas às menores lâminas de precipitação aplicadas, o que mostra que a alta energia inicial disponibilizou maior quantidade de sedimentos juntamente com a ocorrência de escoamento superficial com grande capacidade de transporte em relação aos outros perfis, tendo este atingido um valor máximo, em torno de  $60 \text{ g min}^{-1}$ , para um total aplicado de 7,2 mm. Os perfis de precipitação duplos exponenciais adiantado e atrasado apresentaram taxas de perdas de solo máximas com valores intermediários, sendo iguais a  $30,5$  e  $46,7 \text{ g min}^{-1}$ , os quais estiveram associados às lâminas de 18,4 e 40,6 mm, respectivamente. Já o perfil constante apresentou crescimento progressivo da taxa de perdas de solo em função da lâmina aplicada, atingindo valor máximo de  $5,2 \text{ g min}^{-1}$ , associado à lâmina de 55 mm, apresentando assim a menor perda total de solo. Ao final das aplicações observou-se uma

tendência de redução das taxas de perdas de solo para os perfis com intensidade variável ao longo do tempo, se aproximando dos valores observados para o perfil constante, sendo que estes valores variaram entre 5,2 e 9,5 g min<sup>-1</sup>.

Nas Figuras 23 a 26 são apresentadas as intensidades de precipitação, as taxas médias de perdas de solo e do escoamento superficial referentes às seis repetições realizadas na terceira aplicação para os perfis constante, exponencial negativo, duplo exponencial adiantado e duplo exponencial atrasado, respectivamente.

Nos Apêndices 1B a 4B são apresentadas as perdas de solo referentes a uma das repetições realizadas durante a terceira aplicação para os perfis constante, exponencial negativo, duplo exponencial adiantado e duplo exponencial atrasado, respectivamente.

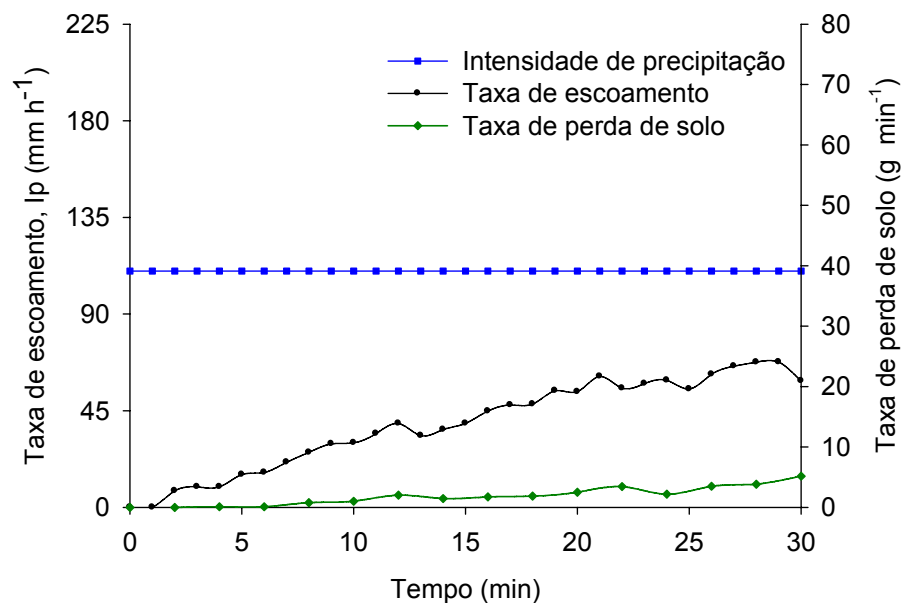


Figura 23. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil constante na terceira aplicação e considerando seis repetições.

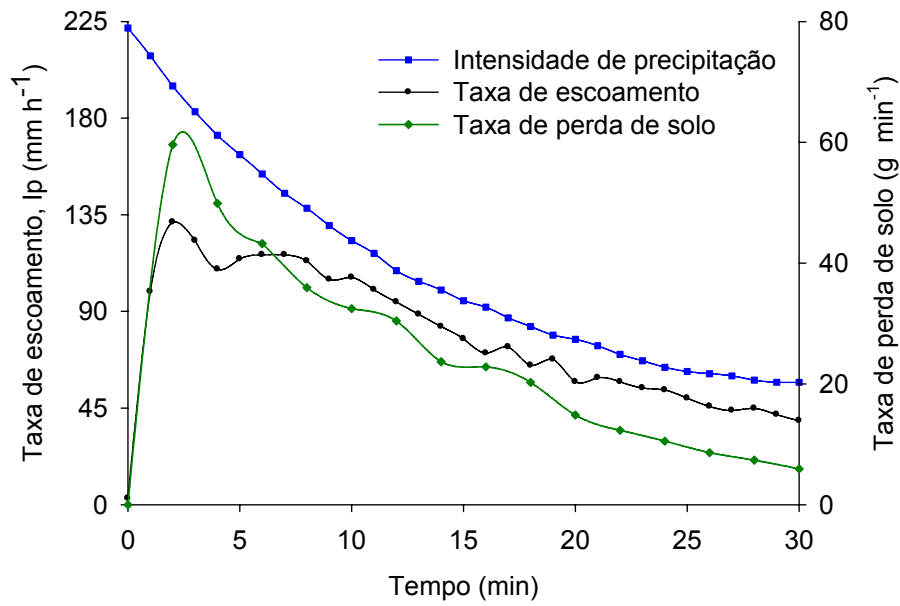


Figura 24. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil exponencial negativo na terceira aplicação e considerando seis repetições.

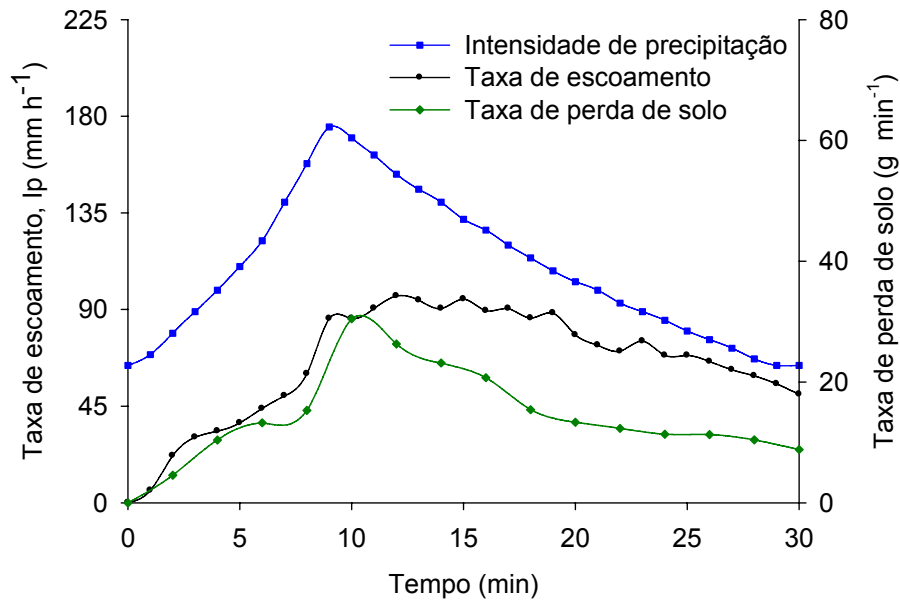


Figura 25. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial adiantado na terceira aplicação e considerando seis repetições.

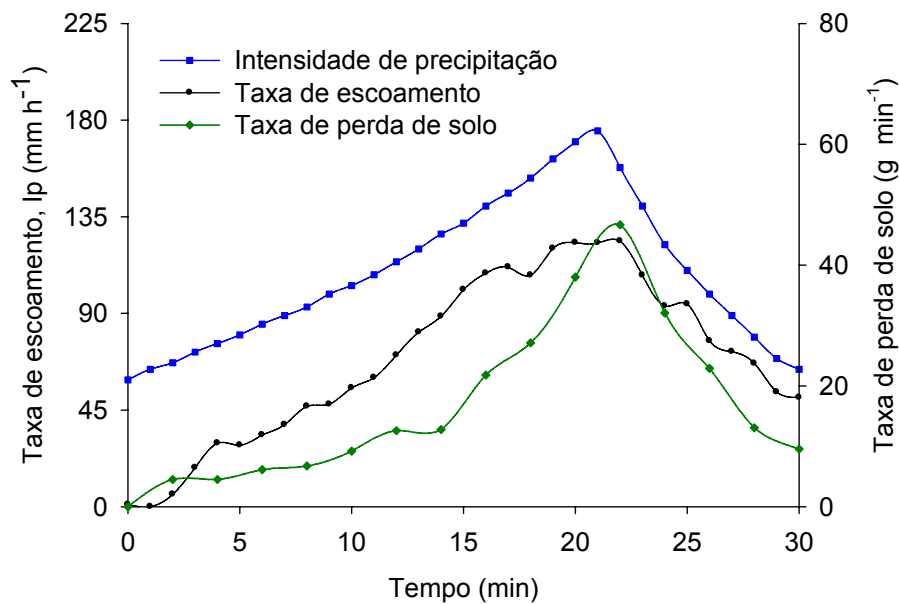


Figura 26. Intensidade de precipitação, taxas médias de perdas de solo e de escoamento superficial obtidas para o perfil duplo exponencial atrasado na terceira aplicação e considerando seis repetições.

As variações das taxas de perdas de solo evidenciadas ao longo das aplicações em cada perfil de precipitação dependeram diretamente do grau de influência dos componentes energéticos associados ao processo erosivo.

Os perfis de precipitação com maiores intensidades no início do evento, como observado principalmente para o perfil exponencial negativo, apresentaram, neste período, elevada energia cinética associada, e o escoamento gerado, alta capacidade de desprendimento de partículas, sendo que, o que determinou o comportamento diferenciado em termos de perdas de solo foi a combinação desses dois componentes. Quando as maiores taxas de desprendimento de partículas, que estavam associadas às maiores erosividades, coincidiram com a condição em que a energia do componente associado ao transporte dessas partículas também era mais elevada, foram observadas elevadas taxas de perdas de solo.

Para o perfil constante foi evidenciado que nos minutos iniciais dos ensaios prevaleceram altas taxas de infiltração, sendo que o escoamento gerado neste momento não apresentou energia suficiente para o transporte de partículas. A energia associada ao escoamento necessária para o transporte de sedimentos só é atingida a partir dos 6 min, momento a partir do qual são

observadas efetivamente perdas de solo, seguindo um aumento progressivo das taxas até o fim das aplicações. Provavelmente, a tensão cisalhante associada ao escoamento pouco contribuiu para o desprendimento de partículas de solo, em função da pequena carga hidráulica da lâmina escoada, sendo a maior parte do solo desprendido em função da energia do impacto das gotas de chuva, e o escoamento, neste caso, o principal componente relacionado ao transporte de partículas. Foi evidenciado para este perfil de precipitação o menor valor médio de perdas de solo (Figura 23), representado pela área abaixo da curva da taxa de perdas de solo. Apesar dessas considerações, e como já evidenciado para as perdas de água, o comportamento observado para este perfil de precipitação pode ser considerado atípico, e decorrente do comportamento associado às próprias perdas de água.

Os resultados apresentados para o perfil exponencial negativo (Figura 24) caracterizam o efeito da ação conjunta da maior erosividade da chuva e maior escoamento superficial. Além da alta capacidade de remoção de partículas de solo por parte da energia associada às gotas de chuvas, pode ter ocorrido contribuição para o desprendimento de partículas em decorrência da alta tensão cisalhante associada ao escoamento superficial. Assim, a maior taxa de perdas de solo ocorreu juntamente com a maior taxa de escoamento superficial, que atingiram valores máximos já com apenas 2 min de aplicação. Com a redução da intensidade de precipitação observou-se também redução da taxa de escoamento e, conseqüentemente, redução da energia para o transporte de partículas, ocasionando também a queda da taxa de perdas de solo.

Para os perfis duplo exponencial adiantado e atrasado (Figuras 25 e 26), apesar da baixa intensidade de precipitação inicial em relação aos outros perfis, aproximadamente  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , e da menor energia para o desprendimento de partículas em relação aos outros perfis, foi evidenciada a rápida ocorrência de escoamento superficial. Com o aumento da intensidade de precipitação, ocorre também aumento da energia associada à chuva e, conseqüentemente, maior capacidade de desprendimento de partículas do solo. Com a elevação do volume aplicado ocorre o aumento das taxas de escoamento, e a elevação da energia associada a este para o transporte de

partículas, como é evidenciado pela variação das taxas de perda de solo, de forma que as maiores taxas ocorrem próximas aos picos de intensidade.

Após a ocorrência das intensidades máximas observa-se que para o perfil duplo exponencial adiantado houve uma redução mais gradual das taxas de escoamento superficial e da taxa de perda de solo quando comparado ao perfil duplo exponencial atrasado. Para o perfil duplo exponencial adiantado a taxa de escoamento foi reduzida em aproximadamente 41% do valor correspondente ao pico, enquanto que as taxas de perdas de solo se reduziram pela metade. Para o perfil duplo exponencial atrasado essas diferenças foram ainda maiores, sendo a taxa de escoamento reduzida em 60%, enquanto que para a taxa de perda de solo houve uma redução de 80%. Apesar das diferenças observadas ao longo das aplicações entre esses dois perfis, nota-se que ao final destas, as taxas de escoamento e de perdas de solo apresentaram grande similaridade, tendendo a valores iguais a  $50 \text{ mm h}^{-1}$  e  $9 \text{ g min}^{-1}$ , respectivamente.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que:

- para as parcelas com baixa umidade inicial do solo não houve escoamento superficial e, conseqüentemente, não houve perdas de solo;

- para as parcelas com condições de umidade inicial do solo definida como intermediária não houve diferenças estatisticamente significativas tanto para as perdas de água quanto para as perdas de solo associadas aos diferentes perfis de precipitação;

- para as parcelas com condições de umidade inicial do solo próxima a saturação houve diferenças estatisticamente significativas nas perdas de água e de solo entre os diferentes perfis de precipitação;

- as maiores perdas de água foram obtidas para o perfil exponencial negativo, que diferiu estatisticamente dos demais perfis, seguido pelos perfis duplo exponencial atrasado e adiantado que não diferiram entre si, e o perfil constante, que não diferiu do perfil adiantado, mas diferiu dos demais perfis; e

- as maiores perdas de solo foram obtidas para o perfil exponencial negativo, que diferiu estatisticamente dos demais perfis, seguido pelos perfis duplo exponencial atrasado e adiantado que não diferiram entre si, e o menor valor para o perfil constante que diferiu estatisticamente dos demais perfis.

## **6. RECOMENDAÇÕES**

Uma das principais preocupações na realização de experimentos de erosão com chuvas simuladas está relacionada ao número mínimo de repetições necessárias a fim de se obter uma representabilidade adequada das variáveis relativas ao processo. Neste trabalho foram utilizadas seis repetições, número considerado bem superior ao observado em trabalhos dessa natureza encontrados na literatura que geralmente se utilizam, em sua grande maioria, de três repetições.

Apesar de esse diferencial ser de grande relevância em relação à maioria dos trabalhos científicos, mesmo com a grande preocupação em relação ao número de repetições ainda assim foram evidenciadas grandes variações entre os tratamentos, representado pelo elevado coeficiente de variação que, em alguns casos, foi um fator limitante para o uso da ferramenta estatística. Além disso, é importante que seja relatado que para a execução deste experimento de campo houve um grande dispêndio de tempo, além da grande necessidade de mão-de-obra.

Assim constatou-se que grandes esforços foram direcionados com o objetivo de se aplicar a repetibilidade aos tratamentos, acreditando-se assim haver uma homogeneização das fontes de variação não controladas, o que não ocorreu. Dessa forma, recomenda-se para trabalhos futuros o uso de um menor número de repetições e um controle maior sobre as fontes de variação.

## 7. REFERÊNCIAS

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.

BAHIA, V. G.; CURI, N.; CARMO, D. N. Fundamentos de erosão do solo (tipos, formas, mecanismos, fatores determinantes e controle). **Informe Agropecuário**, v. 176, n. 16, p. 25-31, 1992.

BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v.31 n.5, p. 1205-1217, 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 4ª ed. Editora Ícone, São Paulo, 1999, 355p.

CHAVES, H.M.L. O modelo WEPP e sua aplicação no Brasil: I. Descrição do modelo. Campinas: IAC, 1992 p. 41-43 (Boletim Informativo).

DAVIS, E.G.; NAGHETTINI, M.C. **Estudo de chuvas intensas no estado do Rio de Janeiro**. 2ª ed. revisada e ampliada. CD-ROM, Brasília: CPRM, 2000.

DUNKERLEY, D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. **Hydrological Processes**, v.22, p. 4415-4435, 2008.

ELTZ, F.L.F.; MEHL, H.U.; REICHERT, J.M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 485-493, 2001.

ENVIROMENTAL AGENCY. **Agriculture and natural resources: benefits, costs and potential solutions**. Environment Agency, Bristol, UK, 2002.

FLANAGAN, D. C.; FOSTER, G. R.; MOLDENHAUER, W. C. Storm pattern effect on infiltration, runoff, and erosion. **Transactions of the ASAE**, v. 31, n. 2 p. 414-420, 1988.

FOSTER, G.R.; McCOOL, D.K.; RENARD, K.E.; MOLDENHAUER, W.C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Soil Water Conservation**, v. 36, p.355-359, 1981.

FREITAS, A.J.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; PINTO, F.A.; PEREIRA, S.B.; GOMES FILHO, R.R.; TEIXEIRA, A.F.; BAENA, L.G.N.; MELLO, L.T.A.; NOVAES, L.F. **Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais, 2001. v1. 65p.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; DE MARIA, I.C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J.C. **A erosão e seu impacto**. p.47-60. In: MANZATTO, C.V., FREITAS JÚNIOR, E., PERES, J.R.R. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002. 174p.

HUANG, C.; BRADFORD, J.M.; CUSHMAN, J.H. A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case. **Soil Science Society of America Journal** v.46, p.14–19, 1982.

LAL, R. Soil erosion and the global carbon budget. **Environment International**, Cumbria, v. 29, p. 437-450, 2003.

LOMBARDI NETO, F. Dimensionamento de terraço. In: **SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA**, 1988, Campinas. Simpósio. Campinas, Fundação Cargill, p. 26-59, 1989.

MAGRATH, W.B.; ARENS, P. **The cost of soil erosion on Java: a natural resource accounting approach**. Environment Department Working Paper 18, World Bank Policy Planning and Research Staff, World Bank, Washington, DC. 1989.

MEYER, L. D; HARMON, W. C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph v.22, n.1, p.100-103, 1979.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C.; McDOWELL, L.L. Sediment size from crop row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 4, p. 891-898, 1980.

MONTEBELLER, C.A.; CEDDIA, M.B.; CARVALHO, D.F.; VIEIRA, S.R.; FRANCO, E.M. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no estado do Rio de Janeiro. **Revista Engenharia Agrícola** v.27, n.2, p. 426-435, 2007.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. 3<sup>a</sup> ed. Blackwell Publishing, 304p, 2005.

NICKS, A.D.; LANE, L.J.; GANDER, G.A. **Weather generator**. In: FLANANGAN, D.C.; NEARING, M.A. (Eds.). Water Erosion Prediction Project (WEPP). West Lafayette. In: USDA/NSEAL, 1995. Paginação irregular. (Technical Documentation. NSERL Report n. 10).

NOVAES, W. **O chão fugindo sob os pés**: Artigo publicado no O Estado de SP, 27/07/2001.

PARSONS, A.J.; STONE, P.M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion. **Catena** n. 67, p. 68-78, 2006.

PARKER, D.B.; MICHEL, T.G.; SMITH, J.L. Compaction and water velocity effects on soil in shallow flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.121, n.2, p.170-178, 1995.

PEREIRA, S. B. **Desprendimento e arraste do solo em decorrência do escoamento superficial**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 81p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F. F., SILVA, D. D.; MATOS, A.T. Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.423-429, 2003 Campina Grande, PB.

PIMENTAL, D.; TERHUNE, E.C.; DYSON-HUDSON, R.; ROCHEREAU, S.; SAMIS, R.; SMOTH, E.A.; DENMAN, D.; REIFSCHNEIDER, D.; SHEPARD, M. **Land degradation: effects on food and energy resources**. Science, v.194: p.149-155, 1976.

PIMENTAL,D.; ALLEN, J.; BEERS, A.; GUINAND, L.;HAWKINS, A.; LINDER, R.; MCLAUGHLIN, P.; MEER, B.; MUSONDA, D.; PERDUE, D.; POISSON, S.; SALAZAR, R.; SIEBERT, S.; STONER, K. 1993. Soil erosion and agricultural productivity. In Pimental, D. (ed.), **World soil erosion and conservation**. Cambridge University Press, Cambridge: 277–92.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 11ª edição. Livraria Nobel S/A Editora, São Paulo. 1990, 465 p.

PIRES, L. S.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LEITE, F. P.; BRITO, L.F. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. **Pesquisa agropecuaria brasileira**. Brasília, v.41, n.4, p.687-695, 2006.

PRUSKI, F.F.; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M.; CECON, P.R. Model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n.1. p. 8-12, 1997.

PRUSKI, F.F.; NEARING, M.A. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations. **Water Resources Research**, v.38, n.12, p.34-1:11, 2002.

PRUSKI, F.F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão**. Viçosa, Ed. UFV, 240p. 2006.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.A.; WEESIES, G.A.; McCOLL, D.K. **Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Washington, USDA, 1997. (Agriculture Handbook, 703).

SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília, MMA/SRH/ABEAS, 1997. 252p.

SILVA, F. G. da ; ROSSONI, H. A. V. **Influência do perfil de precipitação nas perdas de água, Viçosa**, MG: UFV, 2004. 51p. Projeto Final de Curso (pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

SMIL, V. **China's past, China's future: energy, food, environment**. New York: Routledge Curzon, 2004. 232p.

STROH, M.; RALOFF, J. **New UN soil survey: The dirt on erosion**. Science News 141 April 215, 1992.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

TRUMAN,C.C.; STRICKLAND,T.C.; POTTER,T.L.; FRANKLIN,D.H.; BOSCH, D.D. Variable rainfall intensity and tillage effects on runoff, sediment, and

carbon losses from a Loamy Sand under simulated rainfall. **Journal of Environment Quality**, v. 36, p. 1495-1502, 2007.

URI, N.D.; LEWIS, J.A. The dynamics of soil erosion in US agriculture. **Science of the Total Environment**. v. 218: p. 45–58, 1998.

VIEIRA, E. O. **Índices de lixiviação e modelagem do transporte de pesticidas no solo**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 184p. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2003.

VILELA, S. M; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 250p.

WILLIAMS, A.N.; NEARING, M.; HABECK, M.; SOUTHWORTH, J.; PFEIFER, R.; DOERING, O.C.; LOWENBERG-DEBOER, J.; RANDOLPH, J.C.; MAZZOCC, M. A. Global climate change: implications of extreme events for soil conservation strategies and crop production in the midwestern United States. **Proceedings of the 10th International Soil Conservation Organization**. May 23 –28. West Lafayette, IN. 1999.

WILLIAMS, A. **The costs of reducing soil erosion given global climate change – The case of midwestern U.S. farm households**. Ph.D. Dissertation; Department of Agricultural Research, Purdue University, 2000.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Rainfall energy and its relationship to soil loss**. Transactions American Geophysical Union, v. 39, p.285-291, 1958.

ZANETTI, S. S. **Modelo computacional para geração de séries sintéticas de precipitação e do seu perfil instantâneo**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 71p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2003.

ZHENG, F.; HUANG, C.; NORTON, L. D. Vertical hydraulic gradient and run-on and sediment effects on erosion processes and sediment regimes. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, n.1, p.4-11:01-02, 2000.

ZONTA, J.H. **Avaliação do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson em condições de campo**. Viçosa, MG: UFV, 2007. 76p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2007.

## APÉNDICES

## APÊNDICE A

Quadro 1A. Valores de tempo de aplicação, intensidade de precipitação, resistência elétrica obtidos para o perfil constante.

<b>Tempo acumulado (min)</b>	<b>Lâmina (mm)</b>	<b>Intensidade esperada (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistência associada (Ω)</b>	<b>Intensidade estimada (mm h<sup>-1</sup>)</b>
1	1,83	110	119	109,29
2	1,83	110	119	109,29
3	1,83	110	119	109,29
4	1,83	110	119	109,29
5	1,83	110	119	109,29
6	1,83	110	119	109,29
7	1,83	110	119	109,29
8	1,83	110	119	109,29
9	1,83	110	119	109,29
10	1,83	110	119	109,29
11	1,83	110	119	109,29
12	1,83	110	119	109,29
13	1,83	110	119	109,29
14	1,83	110	119	109,29
15	1,83	110	119	109,29
16	1,83	110	119	109,29
17	1,83	110	119	109,29
18	1,83	110	119	109,29
19	1,83	110	119	109,29
20	1,83	110	119	109,29
21	1,83	110	119	109,29
22	1,83	110	119	109,29
23	1,83	110	119	109,29
24	1,83	110	119	109,29
25	1,83	110	119	109,29
26	1,83	110	119	109,29
27	1,83	110	119	109,29
28	1,83	110	119	109,29
29	1,83	110	119	109,29
30	1,83	110	119	109,29

Quadro 2A. Valores de tempo de aplicação, intensidade de precipitação, resistência elétrica obtidos para o perfil exponencial decrescente.

<b>Tempo acumulado (min)</b>	<b>Lâmina (mm)</b>	<b>Intensidade esperada (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistência associada (Ω)</b>	<b>Intensidade estimada (mm h<sup>-1</sup>)</b>
1	3,70	222	129	226,15
2	3,48	209	129	213,53
3	3,25	195	128	200,01
4	3,05	183	128	188,14
5	2,87	172	127	176,81
6	2,72	163	127	167,18
7	2,57	154	126	157,23
8	2,42	145	125	147,09
9	2,30	138	125	139,19
10	2,17	130	124	130,31
11	2,05	123	122	122,82
12	1,95	117	121	116,68
13	1,82	109	119	108,93
14	1,73	104	117	104,27
15	1,67	100	116	100,59
16	1,58	95	114	95,92
17	1,53	92	112	93,02
18	1,45	87	110	87,97
19	1,38	83	108	83,69
20	1,32	79	105	79,26
21	1,28	77	104	77,03
22	1,23	74	102	73,71
23	1,17	70	100	69,46
24	1,12	67	98	66,47
25	1,07	64	96	63,69
26	1,03	62	94	61,91
27	1,02	61	93	61,04
28	1,00	60	93	60,17
29	0,97	58	91	58,38
30	0,95	57	90	57,45

Quadro 3A. Valores de tempo de aplicação, intensidade de precipitação, resistência elétrica obtidos para o perfil duplo exponencial adiantado.

<b>Tempo acumulado (min)</b>	<b>Lâmina (mm)</b>	<b>Intensidade esperada (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistência associada (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Intensidade estimada (mm h<sup>-1</sup>)</b>
1	1,07	64	96	63,69
2	1,15	69	99	68,44
3	1,32	79	105	79,26
4	1,48	89	111	90,03
5	1,65	99	115	99,66
6	1,83	110	119	109,87
7	2,03	122	122	121,77
8	2,33	140	125	141,44
9	2,63	158	127	161,69
10	2,92	175	128	179,95
11	2,83	170	127	174,70
12	2,70	162	127	166,09
13	2,55	153	126	156,11
14	2,43	146	126	148,22
15	2,33	140	125	141,44
16	2,20	132	124	132,50
17	2,12	127	123	127,06
18	2,00	120	122	119,71
19	1,90	114	120	113,71
20	1,80	108	119	107,99
21	1,72	103	117	103,35
22	1,65	99	115	99,66
23	1,55	93	113	94,00
24	1,48	89	111	90,03
25	1,42	85	109	85,85
26	1,33	80	106	80,38
27	1,27	76	103	75,91
28	1,20	72	101	71,55
29	1,12	67	98	66,47
30	1,07	64	96	63,69

Quadro 4A. Valores de tempo de aplicação, intensidade de precipitação, resistência elétrica obtidos para o perfil duplo exponencial atrasado.

<b>Tempo acumulado (min)</b>	<b>Lâmina (mm)</b>	<b>Intensidade esperada (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Resistência associada (Ω)</b>	<b>Intensidade estimada (mm h<sup>-1</sup>)</b>
1	0,98	59	92	59,28
2	1,07	64	96	63,69
3	1,12	67	98	66,47
4	1,20	72	101	71,55
5	1,27	76	103	75,91
6	1,33	80	106	80,38
7	1,42	85	109	85,85
8	1,48	89	111	90,03
9	1,55	93	113	94,00
10	1,65	99	115	99,66
11	1,72	103	117	103,35
12	1,80	108	119	107,99
13	1,90	114	120	113,71
14	2,00	120	122	119,71
15	2,12	127	123	127,06
16	2,20	132	124	132,50
17	2,33	140	125	141,44
18	2,43	146	126	148,22
19	2,55	153	126	156,11
20	2,70	162	127	166,09
21	2,83	170	127	174,70
22	2,92	175	128	179,95
23	2,63	158	127	161,69
24	2,33	140	125	141,44
25	2,03	122	122	121,77
26	1,83	110	119	109,87
27	1,65	99	115	99,66
28	1,48	89	111	90,03
29	1,32	79	105	79,26
30	1,15	69	99	68,44

## APÊNDICE B

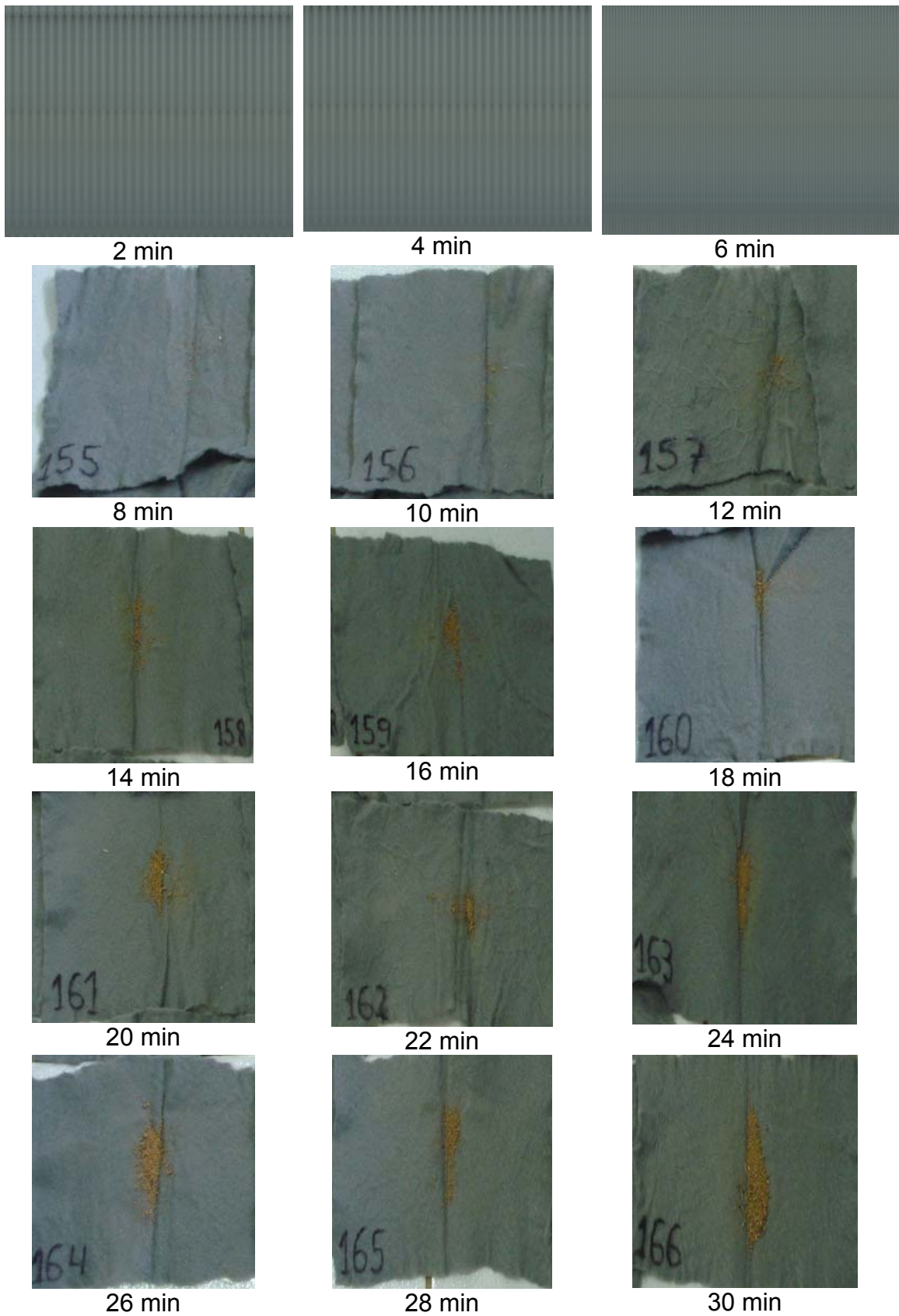


Figura 1B. Perdas de solo coletadas em uma das repetições realizadas para o perfil de precipitação constante durante a terceira aplicação.

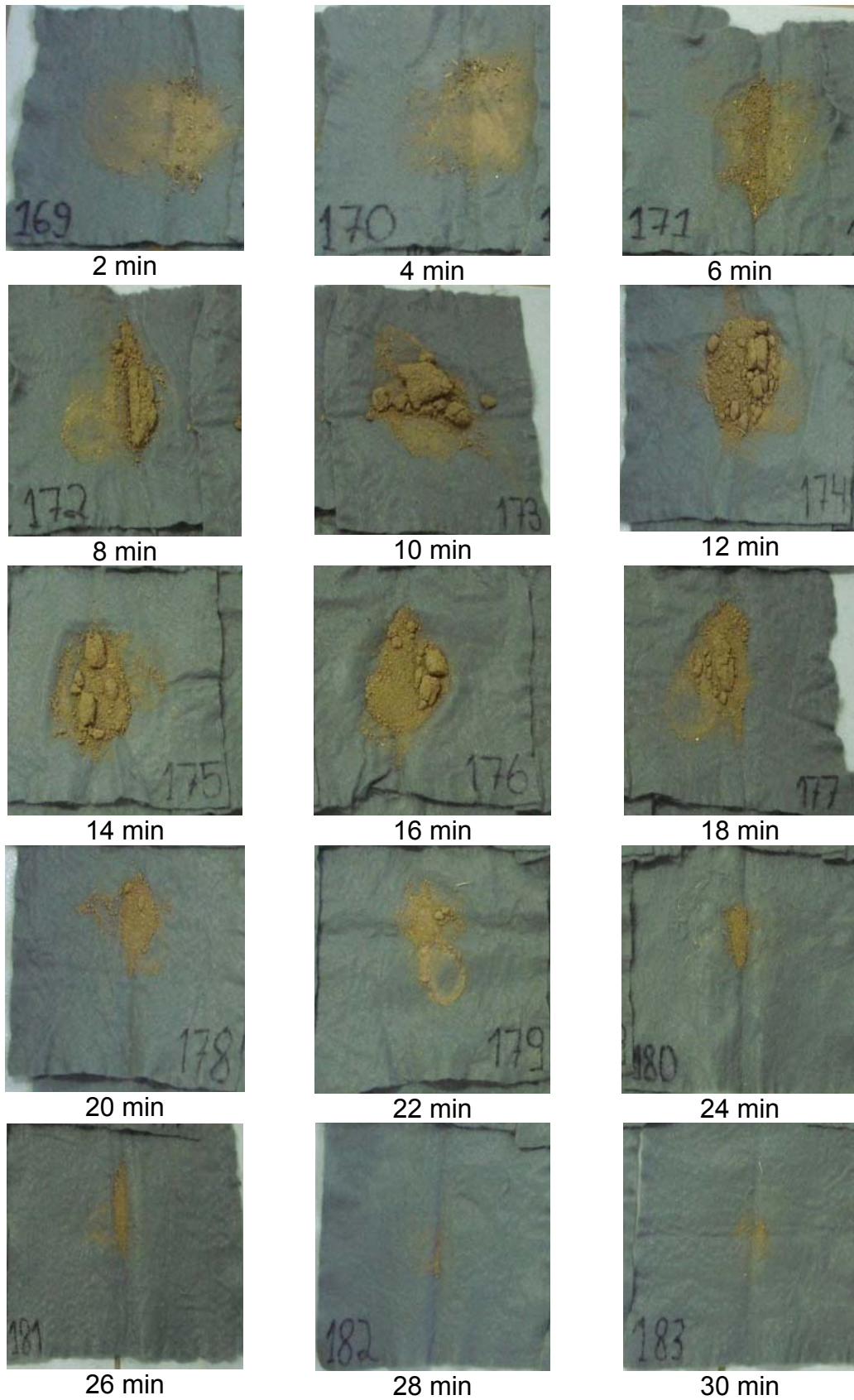


Figura 2B. Perdas de solo coletadas em uma das repetições realizadas para o perfil de precipitação exponencial negativo durante a terceira aplicação.

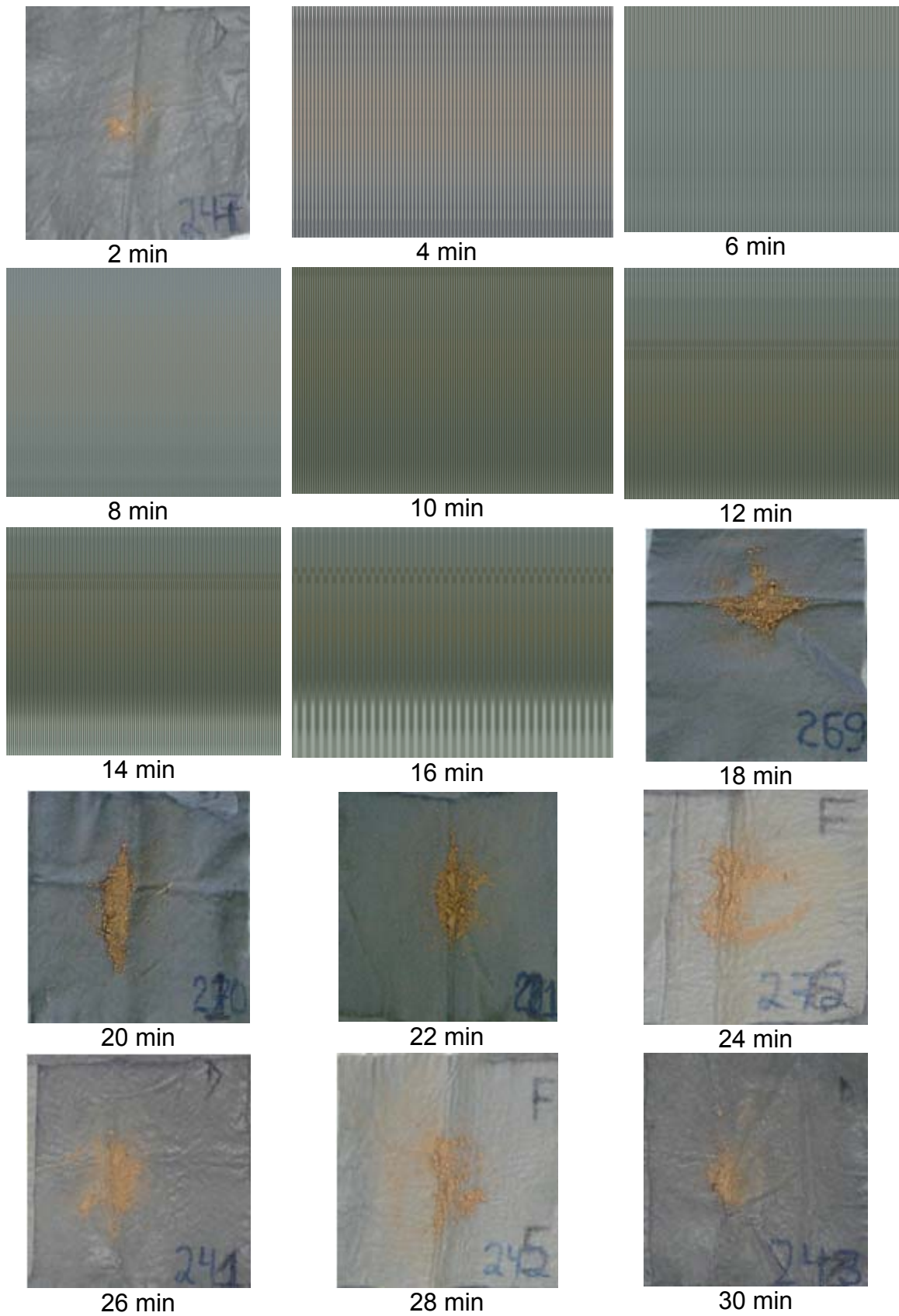


Figura 3B. Perdas de solo coletadas em uma das repetições realizadas para o perfil de precipitação duplo exponencial adiantado durante a terceira aplicação.

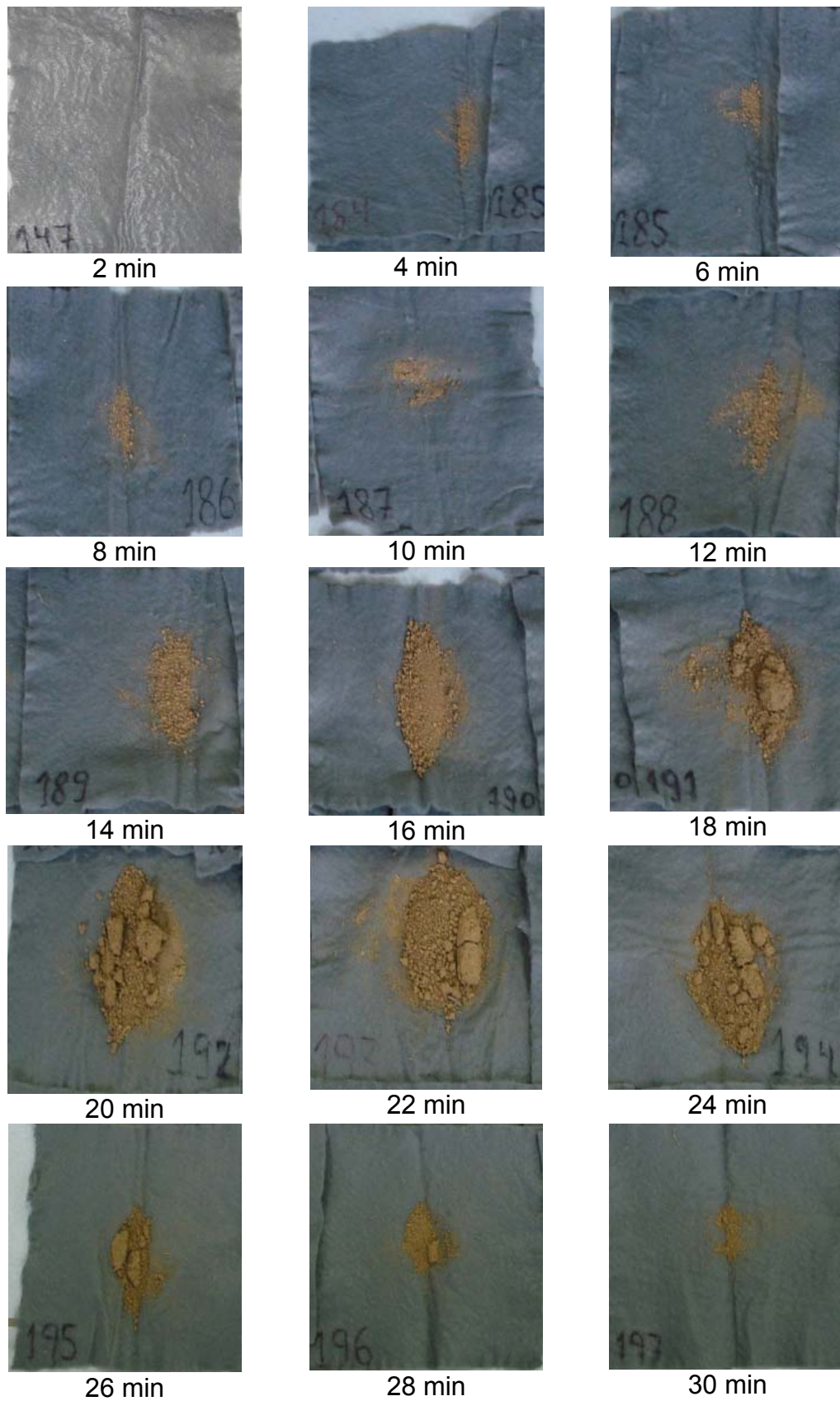


Figura 4B. Perdas de solo coletadas em uma das repetições realizadas para o perfil de precipitação duplo exponencial atrasado durante a terceira aplicação.