



IV-197 - DINÂMICA DE DEFLÚVIO SUPERFICIAL RASO SIMULADO E A VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DE ESCOAMENTO NA MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS

Lucien Akabassi⁽¹⁾

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes.

Fernanda Provedel Zambom⁽²⁾

Tecnóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes.

José Antonio Tosta dos Reis⁽³⁾

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes.

Dejanyne Paiva Zamprogno⁽³⁾

Doutor em Hidráulica e Saneamento/ Recursos Hídricos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes.

Marco Aurélio Costa Caiado⁽³⁾

PhD. Biological Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute (VirginiaTech). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes.

Endereço⁽¹⁾: Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara – CEP: 29040-780 - Vitória – ES. Tel.: (27) 3331-2237 - e-mail: [lucien@ifes.edu.br/](mailto:lucien@ifes.edu.br) lucien.ak@gmail.com

RESUMO

O destacamento e o transporte de partículas do solo pelo escoamento superficial, e a deposição desse material nas bacias hidrográficas ou no sistema fluvial constituem sub-processos de grande relevância nos estudos dos processos erosivos. Por constituir um problema mundial, causador de impactos ambientais e econômicos de grande magnitude, a investigação e estudo dos seus mecanismos com o objetivo de melhorar os métodos de avaliação e de estimativas de perda de solo e a previsão de produção de sedimentos em bacias hidrográficas representam um desafio na busca de parâmetros e variáveis fundamentais no equacionamento do fenômeno.

A formulação de modelos de erosão requer o conhecimento e a obtenção das variáveis fundamentais envolvidas no processo erosivo, de modo a descrever o mais fidedignamente possível a dinâmica característica inerente. A experimentação em condições controladas permite investigar variáveis físicas mensuráveis e de fácil obtenção associada ao escoamento superficial, possibilitando assim estabelecer novas metodologias de quantificação e estudo de previsões de produção de sedimentos em bacias hidrográficas. A simulação de escoamento raso foi realizada por meio de um simulador de chuvas intensas, com intensidades variando de 100 mm a 170 mm/h, e a variação da profundidade investigada num domínio experimental de 500 m² (10 m x 50 m), solo coeso e declividade do plano de escoamento igual a 4,58 %. Os registros da variação da profundidade do escoamento permitiram avaliar a potência de escoamento do fluxo e a dinâmica do mesmo devido o microrrelevo do leito de escoamento. O estudo mostrou que a medição da variação da profundidade do escoamento superficial é fundamental na investigação da erosão hídrica com base na fundamentação física e hidrodinâmica do processo erosivo em função da forte interferência do microrrelevo do leito sobre a hidráulica do escoamento. No entanto, os resultados obtidos pela aplicação da potência de escoamento ainda são insuficientes para explicar adequadamente a remoção, mas demonstram que a investigação da hidrodinâmica do escoamento raso, associada à variáveis topográficas e de resistência do solo mensuráveis em diferentes estados de cobertura vegetal e de teor de umidade, poderá melhorar significativamente a precisão das previsões de produção de sedimentos e estimativas de perdas de solo em bacias hidrográficas.

PALAVRAS-CHAVE: Processos erosivos; Escoamento superficial simulado; Modelagem da erosão hídrica; Sedimentos.



INTRODUÇÃO

A remoção e o transporte de partículas do solo pelo escoamento da água em excesso na superfície do terreno e a deposição deste material constituem os principais sub-processos da erosão. Por ser um problema mundial causador de grandes impactos ambientais e econômicos, a investigação e o estudo dos fundamentos de seus mecanismos com o objetivo de melhorar a precisão das estimativas de perda de solo e a previsão de produção de sedimentos em bacias hidrográficas revelam-se ter grande relevância.

De fato, a erosão, por meio da geração de sedimentos, torna-se um importante agente de degradação ambiental, de redução de produtividade agrícola, de assoreamento de reservatórios, lagos e cursos d'água. Em áreas de exploração agrícola intensiva, a poluição pelos defensivos agrícolas é acelerada devido à adsorção dos elementos ativos dos produtos químicos às partículas de solo que constituem os sedimentos. Os fertilizantes aplicados pouco tempo antes da ocorrência de um evento hidrológico seguido de escoamento superficial severo, são perdidos, arrastados pela erosão. Se por um lado, dentro de certo limite o processo de erosão pode ser considerado natural, por outro, a má ocupação do solo, tanto na agricultura quanto na urbanização, acelera a erosão. Os prejuízos causados pela erosão afetam, portanto, as áreas agrícolas, obras hidráulicas, obras de infra-estruturas urbanas principalmente em fase de execução e o meio ambiente com um custo sócio-econômico elevado.

Os principais modelos de erosão são construídos com base em fatores envolvidos no processo da erosão, incluindo características climáticas, propriedades dos solos, topografia e práticas culturais de uso dos solos. No entanto, a maioria desses modelos apresenta limitações, pois são geralmente formulados em escalas e para regiões diferentes daquelas nas quais são aplicados, situações em que os processos e interações importantes nos mecanismos nem sempre se encontram plenamente desenvolvidos ou estabelecidos. Com base nessas dificuldades, busca-se encontrar e verificar um modelo do processo de erosão que tenha fundamentação em variáveis físicas mensuráveis e de fácil obtenção ligadas ao escoamento superficial, possibilitando assim um aumento na segurança das previsões de estimativas e de produção de sedimentos.

A modelagem matemática representa uma ferramenta muito apropriada para o estudo de processos complexos como a erosão. A formulação de modelos de erosão é extremamente útil para a avaliação do processo em diferentes condições, através de simulações de escoamentos em regimes diversos. A obtenção de dados para fins de análise torna-se muito mais rápida, principal vantagem da modelagem sobre o estudo experimental, exaustivo e empírico, mas a falta de dados experimentais confiáveis para auxiliar nos ajustes e calibração dos modelos construídos representa um entrave a ser transposto.

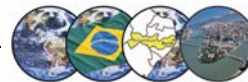
Para tanto, foi desenvolvida uma revisão da literatura onde alguns modelos foram avaliados e, entre eles, selecionado o de potência hidráulica de escoamento. Dados experimentais de simulações de chuvas de alta intensidade em um Latossolo foram analisados, permitindo assim a obtenção de hidrogramas locais de escoamento e a produção de sedimento para cada evento simulado.

Desses eventos, dois foram selecionados para a aplicação do modelo, possibilitando investigar a energia de escoamento associada ao escoamento superficial e produção de sedimento correspondente, além de estimar o potencial de destacamento de partículas e transporte de sedimento pelo fluxo, levando às conclusões apresentadas no trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de erosão hídrica é regido pela hidráulica do escoamento. Em escoamento raso, como é nos escoamentos superficiais, a profundidade da lâmina é de grande relevância para a caracterização da hidráulica do fluxo, assim como a geometria do leito ou microcanais de drenagem. O escoamento superficial depende fundamentalmente do processo de infiltração. A infiltração é definida como a entrada da água no perfil do solo a partir da sua superfície. É um processo hidrológico importante e complexo que deve ser cuidadosamente tratado na hidrologia de bacias, pois é a taxa de infiltração que determina a distribuição e o volume do escoamento superficial durante um evento de chuva.

Diversos fatores influenciam a infiltração como as características texturais do solo, o teor de umidade inicial, a intensidade da chuva, o gradiente do potencial da altura d'água, existência de sedimento no fluxo, a microtopografia. Como esses parâmetros apresentam variações espaciais muitas vezes não desprezíveis a nível



de campo, é importante que se busque levar em conta a variabilidade da infiltração visando maior precisão das estimativas do escoamento superficial.

Modelo de erosão baseada na energia de escoamento

Do ponto de vista de energia hidráulica de escoamento o trabalho de remoção de partículas do solo, ou seja, o processo de erosão, é sustentado pela grandeza Ω que é a energia hidráulica do escoamento. Segundo Bagnold (1977) apud Elliot e Laflen (1993), a potência hidráulica de escoamento é expressa pela equação:

$$\Omega = \rho g S q \quad (1)$$

ou

$$\Omega = \gamma S Q / w \quad (2)$$

onde ρ é a densidade da água, g a aceleração da gravidade, S a declividade do plano do escoamento e q o fluxo da água, em módulo, Q a vazão e w a largura do leito ou microcanais de escoamento.

Mas a expressão da força trativa ou da tensão de cisalhamento junto ao leito de escoamento, deduzida a partir da equação de balanço de forças sob condição de escoamento uniforme, é escrita como sendo:

$$\tau = \rho g h S \quad (3)$$

(ρ) (Kg/m³) = densidade (mássica) da água

g (m/s²) = constante da aceleração da gravidade

h (m) = profundidade do escoamento

S = declividade do leito de escoamento (decimal)

Observa-se uma vez que ρ e g sendo constantes, a força trativa, (τ), é proporcional a h e a S .

Como a potência de escoamento Ω (Kg/s³) dissipada para o leito pelo escoamento pode também ser é expressa através do produto da Força trativa pela velocidade média do escoamento (m/s), ou seja,

$$\Omega = \tau V \quad (4)$$

a expressão da potência de escoamento Ω (Kg/s³) reescrita com a introdução da equação de Chezy para relacionar a profundidade do escoamento e a declividade (S) à velocidade, resulta em:

$$\Omega = \rho g C (h S)^{1,5} \quad (5)$$

onde C (m^{1/2}/s) é o coeficiente da descarga em função da profundidade, que é constante para um determinado leito de escoamento.

Observa-se que τ é proporcional a $(h.S)$ e Ω proporcional a $(h.S)^{1,5}$

Observa-se então que a energia hidráulica de escoamento depende da profundidade da lâmina no domínio do escoamento. A obtenção da variação da profundidade do escoamento ao longo do domínio é fundamental para a quantificação e acuidade da estimativa da energia. Sendo uma variável hidráulica característica do escoamento e mensurável, propostas de modelagem matemática da erosão hídrica com embasamento físico dependem da sua obtenção para possibilitar a investigação de detalhes dos mecanismos que atuam na interface microrrelevo-escoamento.

Seleção e análise de dados para aplicação do modelo de potência de escoamento

Simulações experimentais de chuvas de alta intensidade em um Latossolo e o monitoramento em tempo real da variação da profundidade aparente do escoamento no domínio desenvolvidos por Akabassi (1998),

permitiram obter hidrogramas locais e a produção de sedimento para cada evento simulado. O domínio de simulação é apresentado na figura abaixo, possibilitando assim melhor visualização da posição dos sensores (SR) e seções do experimento.

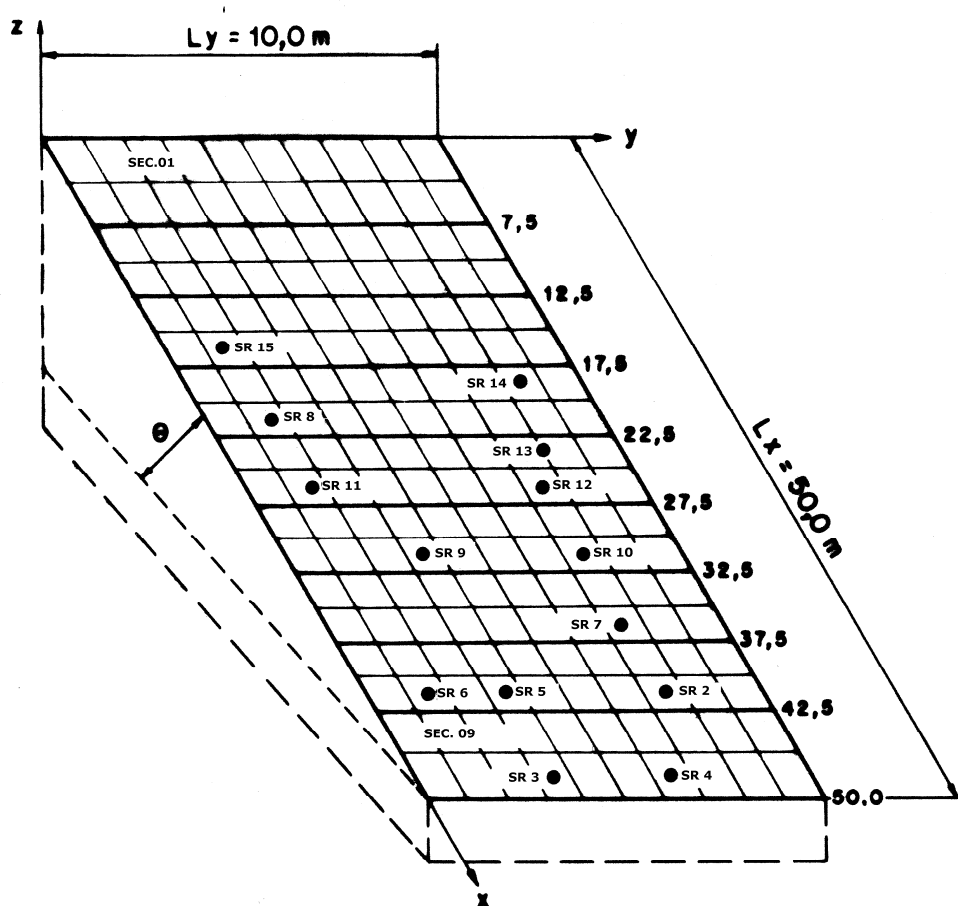


Figura 1 – Domínio do experimento

Dois eventos de chuva simulada foram selecionados para a investigação da energia de escoamento associada ao escoamento superficial e produção de sedimento correspondente.

A partir desses dados experimentais aplicou-se o modelo de energia hidráulica de escoamento para estimar a capacidade de destacamento de partículas e transporte de sedimento pelo fluxo.

Características dos eventos.

- Primeiro evento
duração da simulação: 60 minutos
intensidade de precipitação: 101,70 mm/hora
quantidade de sedimento: 2,36 kg
- Segundo evento
duração da simulação: 120 minutos
intensidade de precipitação: 137,28 mm/hora
quantidade de sedimento: 6,56 kg



O ensaio experimental do segundo evento selecionado apresenta uma duração total de 120 minutos, mas dividida em 2 partes de 60 minutos (A – primeiros 60 minutos e B – 60 minutos finais), sem recolhimento do sedimento produzido nos primeiros 60 minutos, sendo recolhido apenas no final dos 120 minutos totais. A interrupção ocorreu apenas para providenciar a troca do registro de monitoramento das alturas de escoamento devido à capacidade de armazenamento do arquivo. Desta forma, os eventos que seguiram esta estratégia experimental apresentam como diferença principal o teor de umidade antecedente da segunda parte do ensaio igual ao de saturação do solo.

Aplicação do modelo da energia hidráulica de escoamento

O modelo apresentado foi aplicado com os dados dos registros de profundidade aparente do escoamento no domínio de simulação experimental, resultando nos gráficos de variação da potência hidráulica do escoamento associado aos hidrogramas locais de escoamento. Para elaboração desses gráficos, foi selecionado o Sensor 3 da Seção 9, sendo esta a última seção do domínio.

Hidrogramas locais de escoamento superficial

A partir dos dados experimentais dos eventos selecionados, foram obtidos os hidrogramas locais dos pontos monitorados pelos sensores do escoamento, e as curvas correspondentes da potência de escoamento, variável hidráulica que pode explicar o destacamento e o transporte do sedimento pelo fluxo. Apresenta-se a seguir os hidrogramas obtidos para os eventos analisados:

Hidrogramas do primeiro evento selecionado:

- duração da simulação: 60 minutos
- intensidade de precipitação: 101,70 mm/hora
- quantidade de sedimento: 2,36 kg

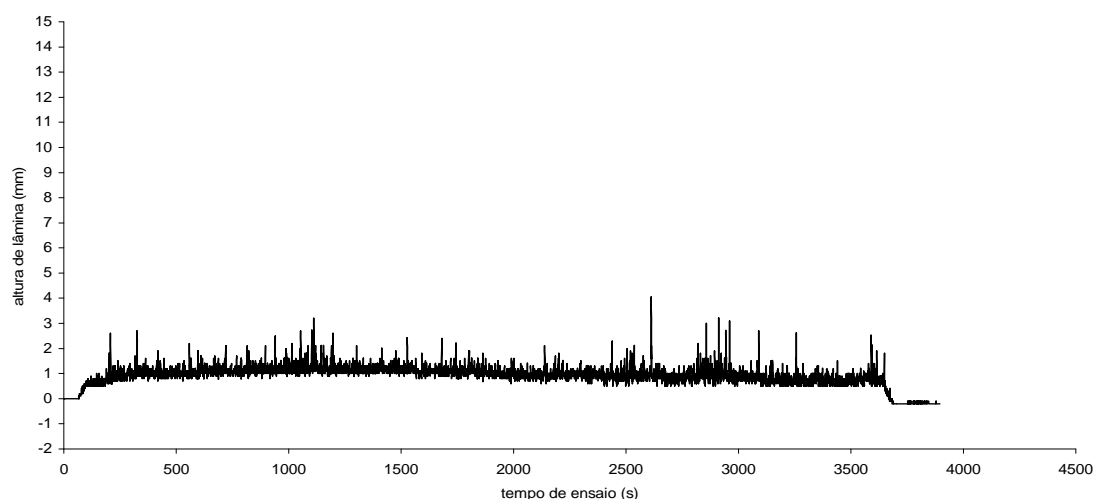


Figura 2 – Variação da altura de escoamento no domínio experimental – Seção 05/SR11 – Primeiro Evento

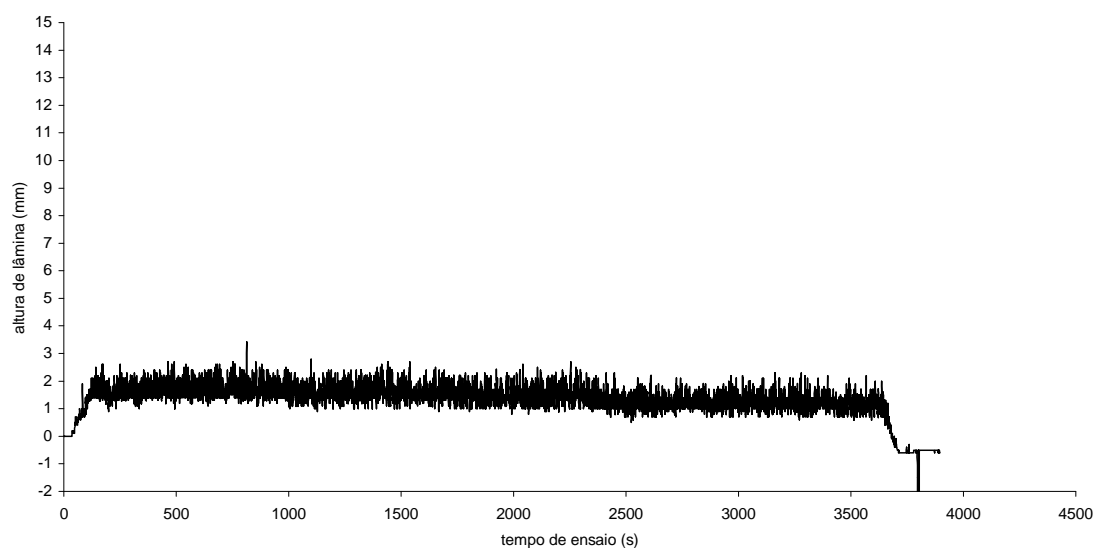


Figura 3 – Variação da altura de escoamento no domínio experimental – Seção 06/SR9 – Primeiro Evento

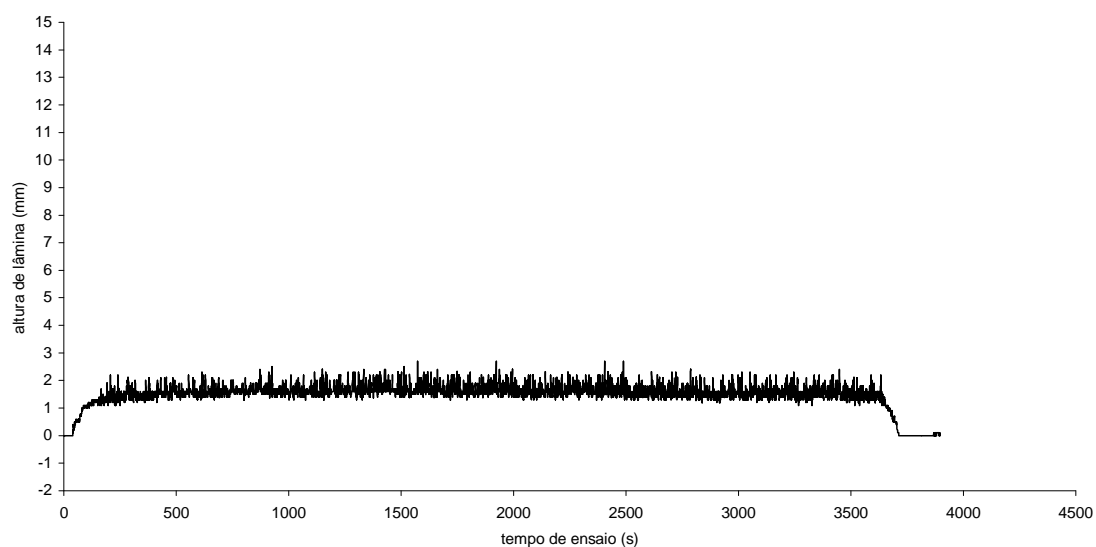


Figura 4 – Variação da altura de escoamento no domínio experimental – Seção 08/SR5 – Primeiro Evento

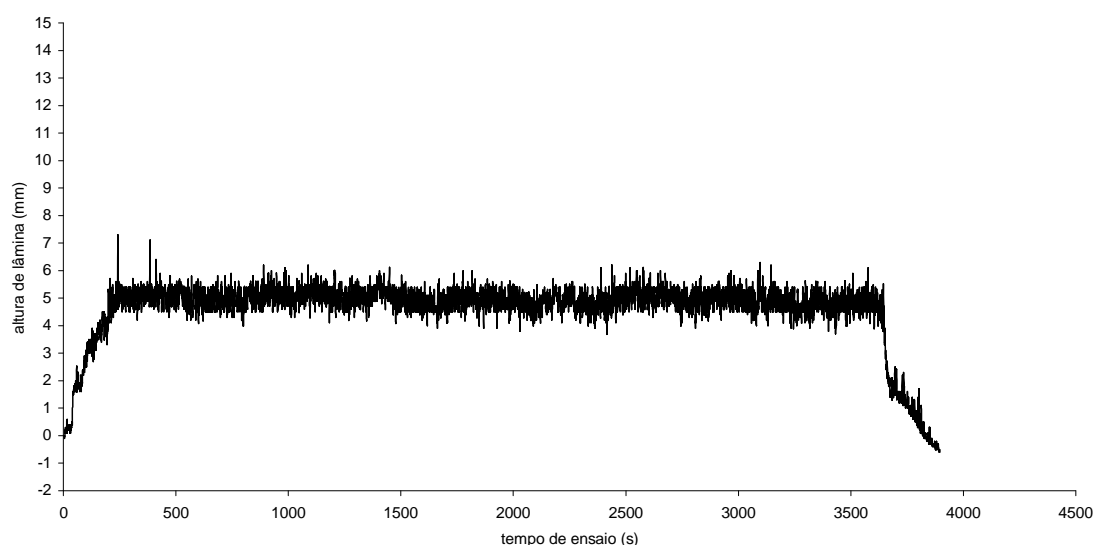


Figura 5 – Variação da altura de escoamento no domínio experimental – Seção 08/SR6 – Primeiro Evento

Os hidrogramas da simulação apresentados acima mostraram que o comportamento do leito de escoamento em função da remoção de material, isto é, a dinâmica do microrrelevo do leito, influencia de forma marcante as profundidades do escoamento. Esta dinâmica se traduz em energia turbulenta característica da não linearidade ou da rugosidade dos hidrogramas. Portanto, pode-se concluir que quanto maior a rugosidade turbulenta, maior a atividade no leito de escoamento, implicando assim em maior taxa de destacamento de partículas.

Também foi verificada que a concentração do fluxo é mais acentuada nas seções finais do domínio, fato que reflete os fundamentos hidrológicos de área de contribuição em um domínio ou bacia hidrográfica, próximo à sua saída, devido à influência positiva da declividade. O efeito da dinâmica do microrrelevo foi também manifestado através da concentração de fluxo em caminhos preferenciais como mostram os registros dos hidrogramas das Figuras 4, 5.

Hidrogramas do segundo evento selecionado:

- duração da simulação: 120 minutos (A – 60 minutos iniciais e B – 60 minutos finais)
- intensidade de precipitação: 137,28 mm/hora
- quantidade de sedimento: 6,56 kg

Os hidrogramas do segundo evento são apresentados a seguir com A e B intercalados em sequência, para melhor visualização e comparação entre os mesmos.

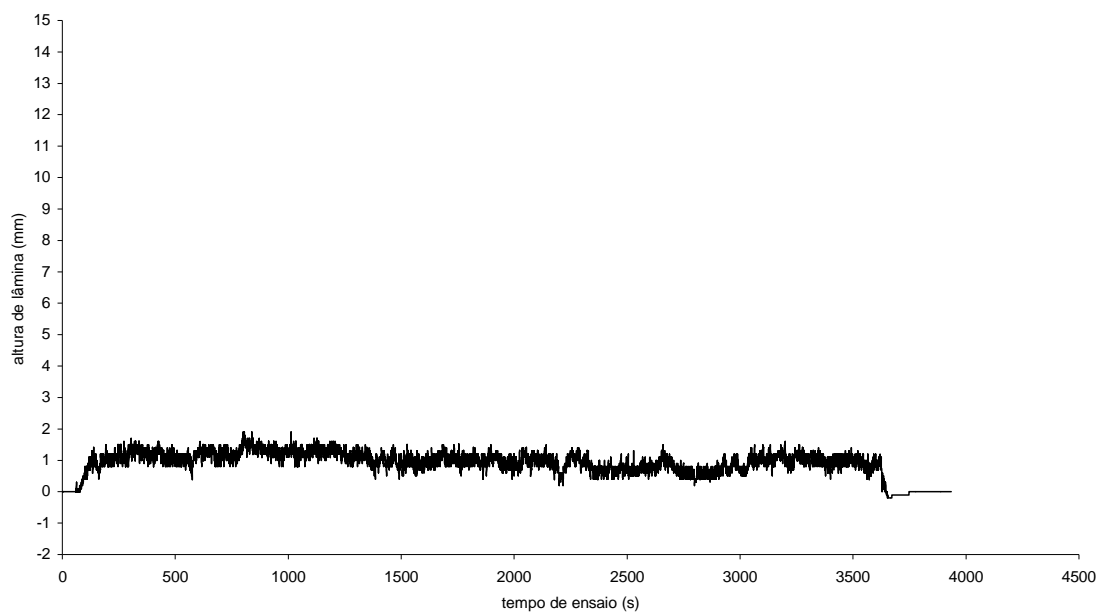


Figura 6 – Variação da altura de escoamento no domínio experimental – Seção 06/SR9 – Segundo Evento A

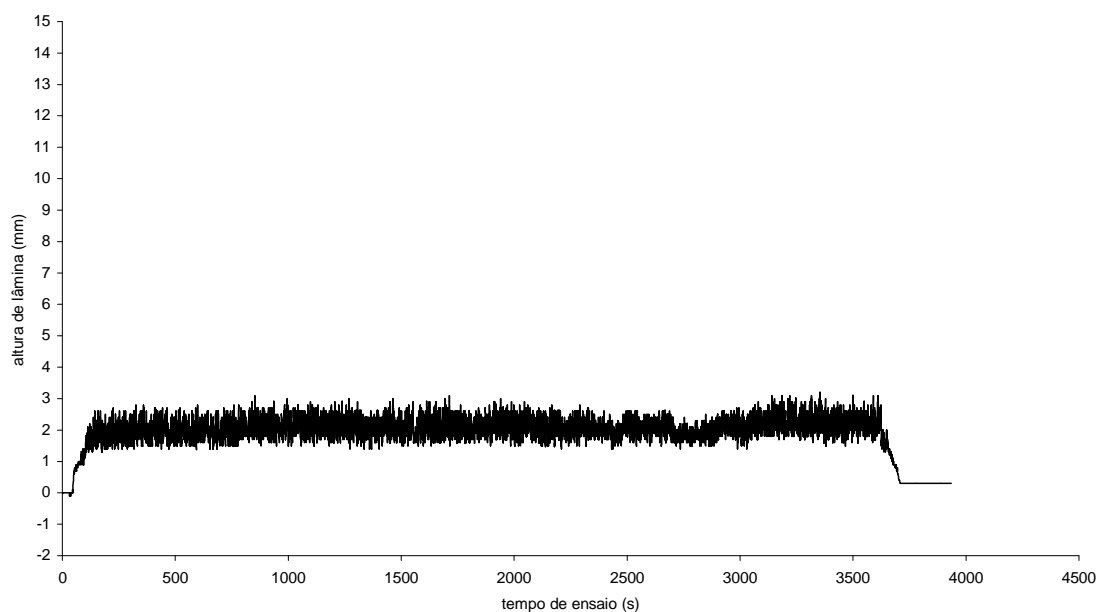


Figura 7 – Variação da altura de escoamento no domínio experimental – Seção 08/SR5 – Segundo Evento A

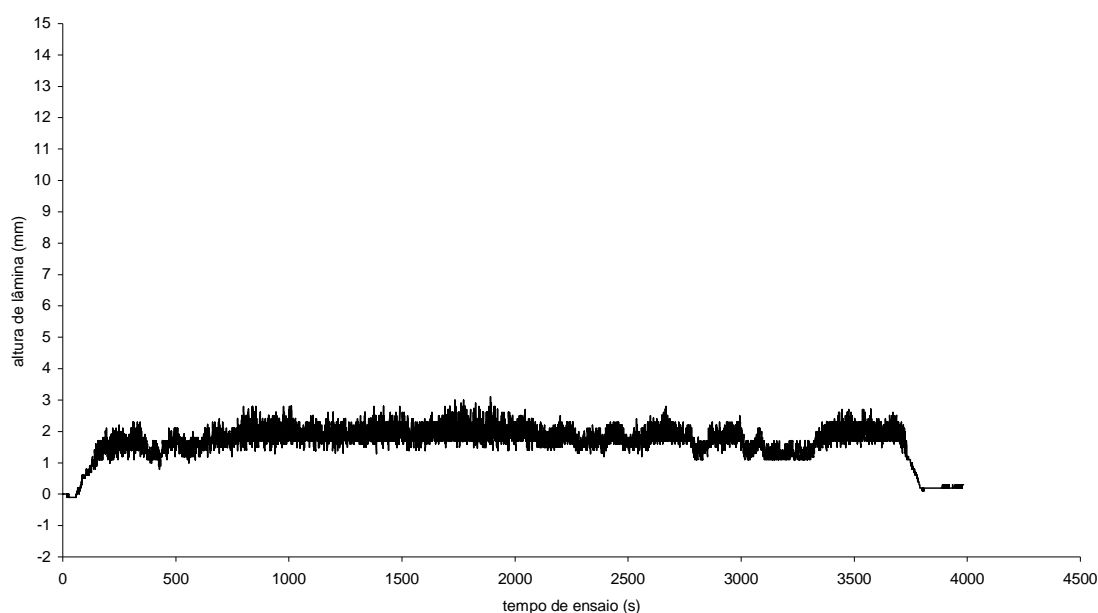


Figura 8 – Variação da altura de escoamento no domínio experimental – Seção 08/SR5 – Segundo Evento B

Foi observado que os hidrogramas da primeira parte do ensaio de 120 minutos apresentaram comportamentos semelhantes aos do primeiro evento selecionado (60 minutos), ressaltando-se as condições iniciais específicas do solo e da influência do vento. O tempo de estabilização do volume do deflúvio não foi muito diferente entre as duas partes do ensaio, o que possivelmente pode ser devido à chuva natural anterior ao ensaio.

No caso do segundo evento, observou-se para a segunda parte do ensaio que devido à saturação do solo durante os primeiros 60 minutos, o tempo de início do escoamento detectável pelos sensores ficou menor do que na primeira parte, assim como o tempo para a concentração na saída da área experimental. A atividade do leito do escoamento mostrou-se intenso quanto mais longo é o tempo de simulação a exemplo do demonstrado pelos hidrogramas locais da Segunda parte do ensaio de 120 minutos de duração, Figura 8, comparada com a Figuras 7.

Resultados da aplicação do Modelo de Potência de Escoamento

A aplicação do modelo de potência de escoamento aos dados de registro da profundidade de escoamento no domínio revelou um padrão de comportamento idêntico, em termos de dinâmica, acompanhando a tendência de rugosidade das alturas de escoamento registradas nos pontos de monitoramento, como ilustrado nas Figuras 9, 10 e 11 do sensor 3 na seção 9.

A análise do comportamento da potência de escoamento foi ilustrada pelo sensor 3 apenas, mas pode ser generalizada para todos os pontos monitorados, considerando que a potência de escoamento é proporcional a $(h.S)^{1,5}$ força trativa proporcional a $(h.S)$, conforme as equações (4) e (5).

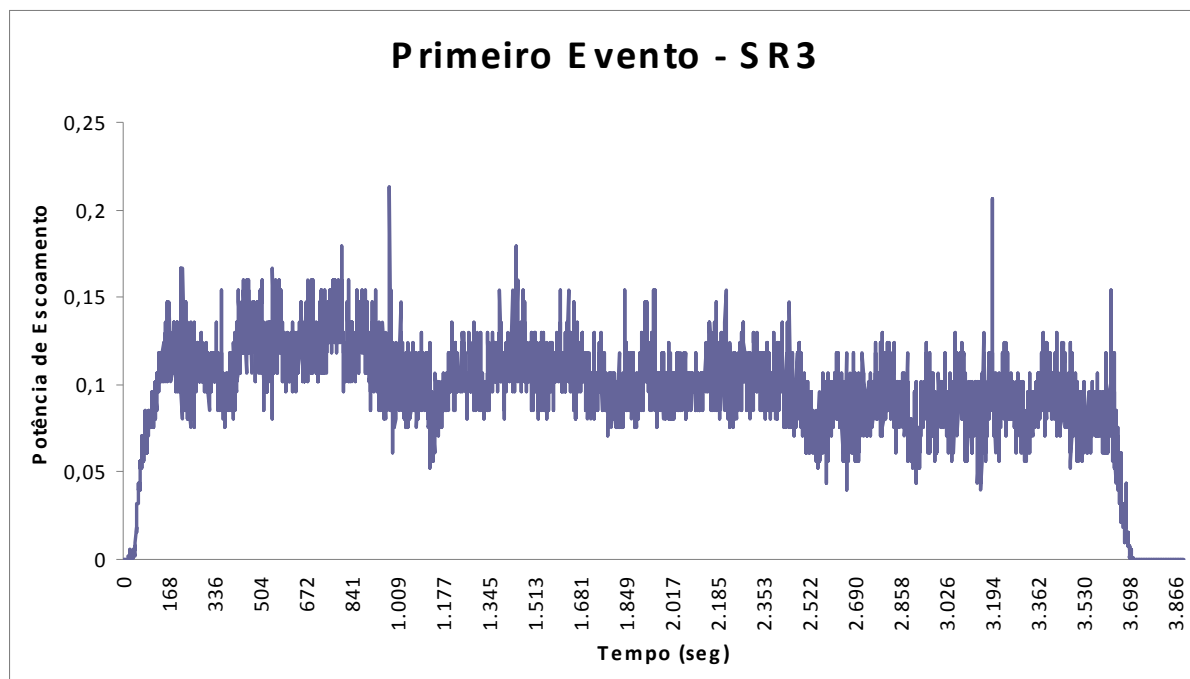


Figura 9 – Comportamento da potência de escoamento do hidrograma do primeiro evento – sensor 3

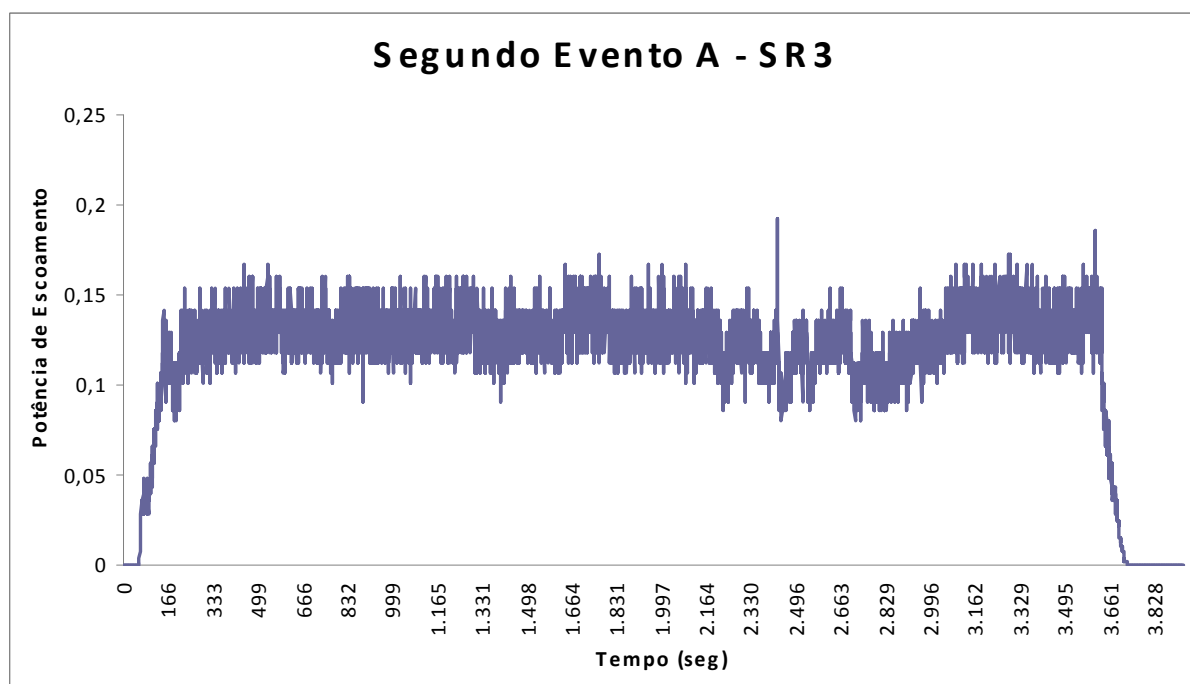


Figura 10 – Comportamento da potência de escoamento do hidrograma do segundo evento A – sensor 3

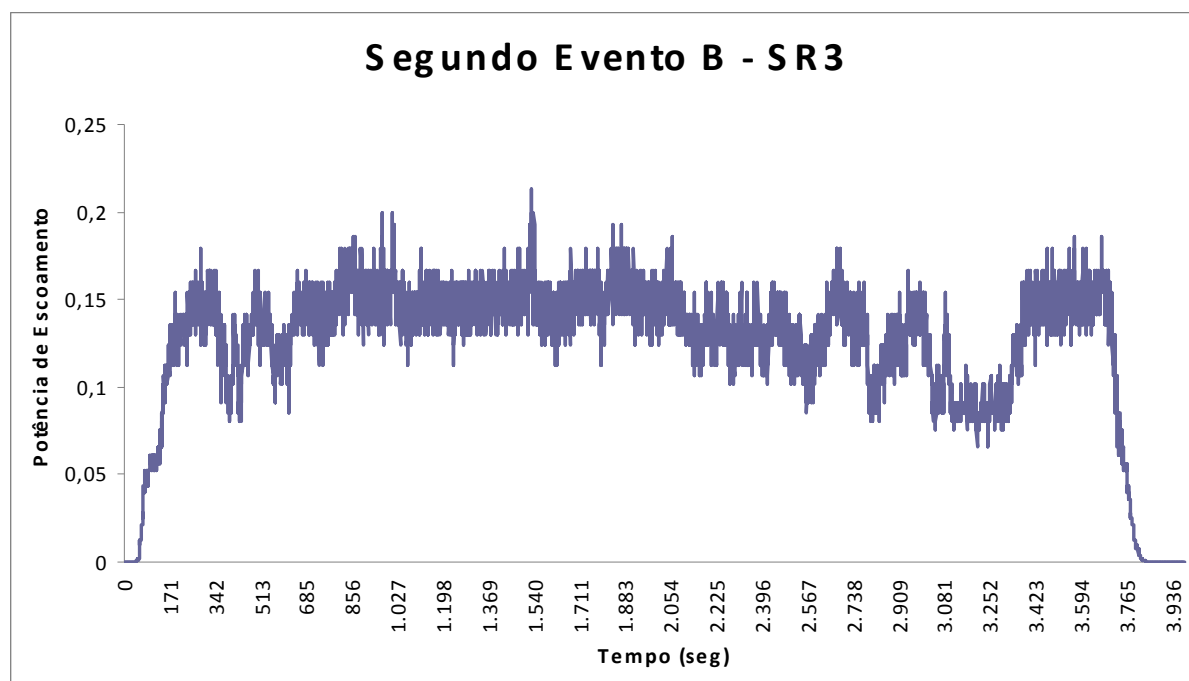


Figura 11 – Comportamento da potência de escoamento do hidrograma do segundo evento B – sensor 3

Essa revelação que, em vista da formulação da expressão da potência de escoamento e da força trativa, parece óbvia, pode sofrer mudanças na tendência devido à quantidade de sedimento em suspensão por reduzir a rugosidade observada. A atividade efetiva do leito de escoamento provê explicação semelhante à da rugosidade observada para as alturas aparentes do escoamento.

A evolução do microrrelevo do leito possui, portanto, uma forte influência sobre a rugosidade turbulenta, determinando assim a capacidade de destacamento e transporte de sedimento pelo escoamento raso. No segundo evento, de duração igual a 120 minutos, esta influência foi mais destacada nos tempos finais do ensaio, evidenciando assim um estado mais avançado de modificação do leito de escoamento devido à remoção e transporte de sedimentos.

CONCLUSÕES

Com base nos registros de monitoramento em tempo real de alturas de lâmina de escoamento de deflúvio superficial simulado com alta intensidade de precipitação, foi possível analisar a variabilidade da profundidade aparente do escoamento e a sua potência hidráulica. A variável potência hidráulica de escoamento, por caracterizar a hidráulica do escoamento e ser relativamente fácil quantificar quando se dispõe de registros de profundidade da lâmina adquiridos em tempo real, foi utilizada para avaliar a capacidade de destacamento de partículas do solo e seu transporte pelo fluxo.

Os hidrogramas locais obtidos das simulações experimentais mostraram que a formação do microrrelevo do leito de escoamento é um processo dinâmico traduzido pela rugosidade turbulenta apresentada. No caso de solo coeso com alto teor de argila, como foi o caso dos experimentos, a produção de sedimento por evento revelou-se baixo, caracterizando que a formação e consolidação de microcanais de escoamento concentrado é um processo lento. Com a evolução do microrrelevo devido o processo de remoção-deposição-remoção dependendo das características hidráulicas do escoamento, a rede de microcanais sofre constantes ajustes devido a dinâmica de remoção, condicionando a concentração do escoamento. Assim, microcanais se aprofundam ou se fecham total ou parcialmente, causando desvio de fluxo, o que se reflete em leituras nulas de alguns sensores, mesmo que estes tenham tido efetividade de registro em eventos anteriores, e podendo ser operacionais em outros eventos subsequentes.



O resultado da evolução do microrrelevo são registros de alturas de deflúvio bem definidos e separáveis, consequência da concentração e o aumento da profundidade do escoamento, conforme ilustrado pelos hidrogramas locais das seções finais do domínio de escoamento.

A evolução do microrrelevo do leito possui, portanto, uma forte influência sobre a rugosidade turbulenta, determinando assim a capacidade de destacamento e transporte de sedimento pelo escoamento raso. No segundo evento, de duração igual a 120 minutos, a forte influência foi mais destacada nos tempos finais do ensaio, evidenciando assim um estado avançado de modificação do leito de escoamento devido à remoção e transporte de sedimentos.

A aplicação do modelo de potência de escoamento demonstrou a mesma tendência de rugosidade turbulenta observada nos hidrogramas locais, e demonstra a capacidade de ser uma variável capaz de descrever o processo de destacamento e transporte de sedimentos em escoamentos rasos.

Uma característica importante do microrrelevo em relação ao escoamento é a sustentação da turbulência que é responsável pelos escoamentos secundários em torno dos elementos que compõem o próprio microrrelevo e cuja energia é utilizada no desprendimento de sedimento. É uma relação de equilíbrio até o limite aonde a força da gravidade seja absolutamente dominante, e o microrrelevo passa a não ter mais nenhum controle sobre o escoamento.

A grande dificuldade que ainda persiste na aplicação de modelos de embasamento físico com variáveis características mensuráveis do escoamento consiste na determinação das condições dinâmicas do leito de escoamento em tempo real concomitantemente ao monitoramento da profundidade de lâmina. Neste ponto, ainda é preciso desenvolver técnicas específicas que incorporem a variabilidade temporal e espacial que possam fornecer a evolução do microrrelevo do leito.

Os resultados das análises realizadas com base nos dados experimentais indicaram que é possível utilizar a variável potência de escoamento para modelar a remoção e transporte de sedimentos, mas isso requer maiores informações de registro de dados de lâminas de escoamento em tempo real e da dinâmica do leito de escoamento, e, principalmente, o mapeamento rigoroso da rede de microcanais de drenagem. Isso possibilita a individualização do aporte de sedimentos permitindo uma correlação e maior acuidade nas estimativas de perda de solo e da capacidade de previsão do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKABASSI, L. *Estudo Teórico – Experimental do processo erosivo em área de encosta*. São Carlos, EESC-USP, 1999. 204 p. These de Doutorado.
2. AKANBI, A., A., KATOPODES, N. D. Model for flood propagation on initially dry land. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 114, n.7, p. 689-706, 1988.
3. RIGHETTO, A., M., AKABASSI, L. Erosão distribuída em áreas de encosta. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, v. 5, n. 2, p. 43-57, 2000.
4. RIGHETTO, A., M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos: Publicação EESC/USP, Projeto REENGE. 1998. 819 p.
5. SLATTERY, M.C., BRYAN, R.B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*. v.17, p.127-146, 1992.
6. ZHANG, W., CUNDY, T., W. Modeling of two-dimensional overland flow. *Water Resources Research*, v. 25, n.9, p.2019-2035, 1989.