

APLICAÇÃO DE MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO PARA PREVISÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS COM SIMULADORES DE CHUVA

Faruk Lima Santos Abder Rahman Yasin Mohd Yasin

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, Brasil

André Luís Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil

Matheus Marques Martins

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil

RESUMO

Este estudo propõe a utilização do modelo físico-matemático de Martins e Cavalcante (2022) para avaliar a erosão hídrica em bordas de reservatórios e sua aproximação com valores simulados em laboratório. A motivação para esta pesquisa decorre da necessidade de uma gestão eficiente de reservatórios de água, uma vez que desempenham um papel crucial no planejamento socioeconômico, abastecimento público e geração de energia hidrelétrica, e seu descuido pode gerar processos erosivos nas bacias de captação e margens desses reservatórios, que reduzem sua capacidade de armazenamento, resultando em desafios operacionais e econômicos. Neste estudo, adotou-se um modelo analítico sob condição de precipitação constante para simular a infiltração de água no solo. Os dados experimentais, incluindo descarga por unidade de área, acumulação de lâmina d'água, taxa de transporte de sedimentos e perda de solo, foram obtidos por Merabet Júnior (2022) por meio de ensaios conduzidos utilizando um simulador de chuva. Os resultados mostraram boa concordância entre o modelo e os dados experimentais para o perda de solo, enquanto a taxa de carregamento não apresentou uma boa convergência. Além disso, a análise da taxa de carregamento de sedimentos revelou a necessidade de incorporar um parâmetro variável no tempo para melhor representar a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão hídrica, Modelo físico-matemático, Precipitação, Reservatórios de água, Gestão hídrica.

ABSTRACT

This study proposes the use of the physical-mathematical model by Martins and Cavalcante (2022) to evaluate water erosion at the edges of reservoirs and its approximation with values simulated in the laboratory. The motivation for this research comes from the need for efficient management of water reservoirs, as they play a crucial role in socio-economic planning, public supply, and hydroelectric power generation, and their neglect can generate erosive processes in the catchment basins and margins of these reservoirs, which reduce their storage capacity, resulting in operational and economic challenges. In this study, an analytical model under constant precipitation condition was adopted to simulate water infiltration in the soil. The experimental data, including discharge per unit area, water blade accumulation, sediment transport rate, and soil loss, were obtained by Merabet Junior (2022) through tests conducted using a rain simulator. The results showed good agreement between the model and the experimental data for soil loss, while the loading rate did not show good convergence. In addition, the analysis of the sediment loading rate revealed the need to incorporate a time-variable parameter to better represent the erosion caused by the impact of raindrops.

KEYWORDS: Water erosion, Physical-mathematical model, Precipitation, Water reservoirs, Water management.

*Autor correspondente: farukyasin22@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A eficiência na geração de energia em usinas hidrelétricas está intrinsecamente ligada à capacidade de armazenamento de água em seus reservatórios. No entanto, ao longo do tempo, processos erosivos nas bacias de captação e margens destes reservatórios resultam no depósito de sedimentos, reduzindo o volume útil. Este fenômeno gera desafios operacionais e econômicos, como a diminuição na geração de energia e danos mecânicos às turbinas (Eletrobras, 2003).

Neste contexto, modelos físico-matemáticos tornam-se essenciais para descrever o escoamento superficial e o transporte de sedimentos, assim como a previsão do volume erodido em resposta a precipitações. O processo subjacente é descrito pelas equações de continuidade da conservação de massa e de quantidade de movimento, resolvidas numericamente (Wang et al., 2006). Este trabalho, em especial, será baseado no modelo proposto por Martins e Cavalcante (2022).

Este estudo busca aplicar o modelo analítico citado para estudar a erosão hídrica em bordas de reservatórios de reservatórios sob precipitação constante, usando o software Wolfram Mathematica e comparando com dados obtidos por meio experimental, a fim de validar o modelo. O objetivo é simular o comportamento em condições laboratoriais e avaliar como a variação de parâmetros afeta a resistência e a permeabilidade do solo.

2. METODOLOGIA

A metodologia de realização deste estudo foi dividida em várias etapas. Estas incluíram a entrada de dados experimentais, a utilização do modelo proposto por Martins e Cavalcante (2022) e a obtenção dos resultados.

Os resultados do estudo são apresentados em gráficos que permitem comparar a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo em relação aos dados obtidos em laboratório disponibilizados por Merabet Júnior (2022). O ensaio será melhor discretizado no tópico 3.1. Na Figura 1, apresenta-se um fluxograma para facilitar a compreensão dessas etapas.

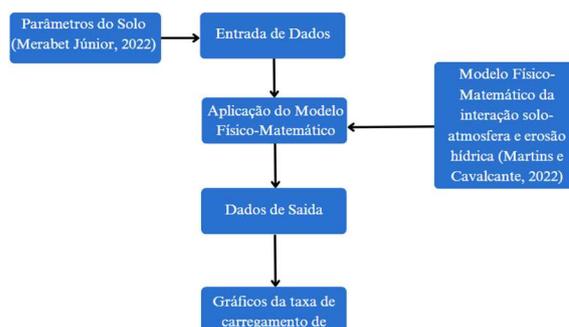


Figura 1. Metodologia de pesquisa.

2.1 Materiais

Os dados experimentais de descarga por unidade de área, lâmina acumulada, taxa de transporte de sedimentos e perda de solo foram coletados por Merabet Júnior (2022) por meio de ensaios utilizando um simulador de chuva. As características geotécnicas do solo utilizado estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização geotécnica das amostras de solo retiradas da UHE Itumbiara.

Ks [m/s]	θ_s	(θ_r)	ρ_s [g/m ³]
0,0004	0,5	0,0022	2,62

Fonte: Merabet Júnior, 2022.

O modelo físico-matemático foi validado utilizando amostras de solo compactado retiradas da margem direita do reservatório da UHE Itumbiara. O reservatório está localizado no rio Paranaíba, entre Itumbiara-GO e Araporã-MG. O solo é predominantemente laterítico e exibe um comportamento bimodal (Merabet Júnior, 2022).

Foram realizados dois ensaios com uma intensidade de precipitação de 181,00 mm/h e 153,00 mm/h com duração de 60 minutos. A identificação específica de cada ensaio está indicada na Tabela 2.

Tabela 2. Ensaios com simulador de chuva realizados.

Ensaio	Incl. (Graus°)	θ_i (%)	e	IP (mm/h)
A1	5	30,1	1,00	181
A2	15	33,1	0,97	153

Fonte: Merabet Júnior, 2022.

Em que, Incl. É a inclinação em graus, θ_i é o teor de umidade volumétrica inicial, e é o índice de vazios e IP é a intensidade pluviométrica. Durante esses ensaios, foram variadas a inclinação da caixa, o teor de umidade volumétrica inicial e o índice de vazios das amostras de solo

Neste estudo, os ensaios A1 e A2 serão utilizados para testar e validar o modelo proposto, proporcionando uma visão sólida da capacidade preditiva do modelo físico-matemático desenvolvido por Martins e Cavalcante (2022).

2.2 Método

Uma nova abordagem para a estimativa do volume de partículas desprendidas por erosão hídrica foi apresentada por Martins (2022). O modelo físico-matemático desenvolvido se aplica a solos unimodais e bimodais, sendo composto de uma solução analítica para o escoamento superficial gerado em um talude inclinado por um evento de chuva com intensidade constante e de uma solução analítica para a equação da continuidade do transporte de sedimentos. Os modelos de Cavalcante e Zornberg (2017) e Costa e Cavalcante (2021) foram empregados para reprodução dos comportamentos unimodal e bimodal do solo, respectivamente.

Por meio dos dados de entrada definidos nos materiais de estudo, será viável efetuar uma comparação entre o resultado observado no campo e a estimativa obtida por meio do modelo analítico. Isso permitirá uma avaliação precisa da eficácia do modelo na previsão da erosão hídrica em condições específicas.

O processo de transporte de sedimentos decorrente de um evento de chuva é descrito pela equação da continuidade. A erosão do solo em um talude inclinado pode ser dividida em erosão por impacto de gotas de chuva (splash) e erosão por escoamento:

$$\frac{\partial[s(z,t)h(z,t)]}{\partial t} + \frac{\partial[s(z,t)h(z,t)]}{\partial z} = \frac{Cp^2}{\rho d} + K[\rho w g J h(z,t) - \tau c] \quad (1)$$

em que, s é a concentração de sedimentos [g/cm^3], h é a lâmina de escoamento superficial [cm], t é o tempo [s], z é a distância ao longo do plano de fluxo [cm], C é a constante de calibração da erosão por impacto de gotas de chuva [g^2min/cm^7], p é a intensidade de precipitação [cm/min], ρd é a massa específica seca do solo [g/cm^3], K é coeficiente de erodibilidade [$g/cm^2/min/Pa$], ρw é a massa específica da água [g/cm^3], g é a aceleração da gravidade [cm/s^2], J é a declividade do plano de fluxo [cm/cm] e h é a lâmina de escoamento superficial [cm] e τc é a tensão de cisalhamento crítica [Pa]. Como a capacidade de infiltração do solo diminui rapidamente no início da chuva, a taxa de infiltração tende a se estabilizar.

Consequentemente, a descarga unitária $Q(z,t)$ e a

lâmina de escoamento $h(z,t)$ também tendem à estabilização. Portanto, a erosão por respingo e por escoamento variam pouco neste estágio estável do escoamento superficial e a taxa de variação da concentração de sedimentos no tempo pode ser desprezada.

$$\frac{\partial[s(z,t)Q(z,t)]}{\partial z} = \frac{Cp^2}{\rho} + K[10\rho g J h(z,t) - \tau c] \quad (2)$$

2.3 Interação Solo-Atmosfera

A interação solo-atmosfera, num sistema dinâmico de fluxo de água e temperatura na superfície terrestre, é fortemente influenciada pelas condições atmosféricas, como temperatura e incidência solar, afetando a umidade do solo e sua capacidade de infiltrar água das precipitações. Isso, por sua vez, desempenha um papel crítico na resistência mecânica do solo e na ocorrência de instabilidades.

A caracterização completa dessa interação exige o estudo do fluxo de umidade no solo, que é afetado por fatores como precipitação e evapotranspiração, influenciando as dimensões da zona não saturada e o gradiente hidráulico, afetando diretamente o escoamento superficial (Borma et al., 2015).

Como mencionado anteriormente, o fluxo de umidade na interface solo-atmosfera é sensível às condições atmosféricas: a precipitação e a evapotranspiração influenciam as dimensões da zona não saturada (Lu e Likos, 2004) e a sucção atuante, resultando em alterações do gradiente hidráulico que interferem diretamente no escoamento superficial (Luiz, 2012).

2.4 Modelo físico-matemático

A abordagem analítica proposta por Cavalcante e Zornberg (2017) para modelar o fluxo de água transiente em meios não saturados apresenta uma vantagem significativa ao incorporar somente um parâmetro de ajuste, o qual possui uma interpretação física clara. O parâmetro δ , conforme demonstrado por Costa e Cavalcante (2020), está relacionado de forma hiperbólica com o influxo de ar.

Costa e Cavalcante (2021) elaboraram a curva de retenção hídrica do solo para solos bimodais utilizando o princípio da superposição linear (Durner, 1992) e o modelo constitutivo da curva de retenção hídrica proposto por Cavalcante e Zornberg (2017). Substituindo a função de condutividade hidráulica de Costa e Cavalcante (2021) na formulação da sucção

mátrix na frente de umedecimento (Mein e Farrell, 1974):

A sucção mátrix de umedecimento acoplada ao modelo constitutivo de Costa e Cavalcante (para solos bimodais) pode ser descrita como:

$$\psi_f = \frac{\lambda}{\delta_1} [1 - \exp(-\delta_1 \psi_i)] + \frac{1-\lambda}{\delta_2} [1 - \exp(-\delta_2 \psi_i)] \quad (3)$$

É possível separar o fenômeno em dois momentos distintos, sendo o primeiro durante a precipitação, o segundo após a precipitação.

Durante a precipitação, a perda de solo no estágio de ascensão pode ser dada como:

$$P_r(t) = \left\{ \left(\frac{c_r p^2}{\rho_d} \right) (t_s - t_p) + \frac{40}{9} K_e \rho_w g \sqrt{J} n L \left\{ \ln \left[\cosh \left[\frac{3}{2} \sqrt{\frac{\alpha p_e(t_s)}{L}} (t_s - t_p) \right] \right] \right\} \right. \\ \left. + \ln \left[1 + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\alpha q(t_s)}{L}} (t - t_s) \right] \right\} - K_e \tau_c (t - t_p) \Bigg\} 10^4 \quad (4)$$

No estágio de recessão do hidrograma, a precipitação efetiva é nula. Consequentemente, a equação da continuidade do transporte de sedimentos é descrita apenas em termos da erosão por escoamento. Dessa forma, a equação da perda de solo no estágio de recessão é descrita como:

$$P(t) = \left\{ \left(\frac{c_r p^2}{\rho_d} - K_e \tau_c \right) (t - t_p) + \frac{40}{9} K_e \rho_w g \sqrt{J} n L \ln \left\{ \cosh \left[\frac{3}{2} \sqrt{\frac{\alpha p_e(t)}{L}} (t - t_p) \right] \right\} \right\} 10^4 \quad (5)$$

2.5 Precipitação

No âmbito da hidrologia, a precipitação compreende toda a água que chega à superfície terrestre vinda da atmosfera (Bertoni e Tucci, 2007). A intensidade se refere à taxa de precipitação por unidade de tempo, com intensidades mais elevadas associadas a chuvas de menor duração. A intensidade de precipitação e a distribuição de gotas apresentam variações notáveis em termos de espaço e tempo durante um evento de chuva natural (Emmanuel et al., 2012).

Essas flutuações podem ser influenciadas por diversos fatores, como a velocidade e a direção do vento, a temperatura atmosférica, o tamanho das gotas e a topografia local (Smith, 1978).

A curva de retenção hídrica do solo (Curva de Retenção de Água no Solo - CRA) é uma representação da relação entre a capacidade de armazenamento de água em um material poroso e a energia exigida para extrair essa água, podendo ser expressa em termos de conteúdo de umidade gravimétrica, conteúdo de

umidade volumétrica, grau de saturação, sucção matricial e sucção total.

A representação gráfica da curva de retenção hídrica no solo é comumente realizada em uma escala semi-logarítmica. A curva de retenção hídrica no solo pode ser categorizada, conforme Figura 2, em três zonas que descrevem os estágios de dessaturação: zona saturada, zona de transição e zona residual.

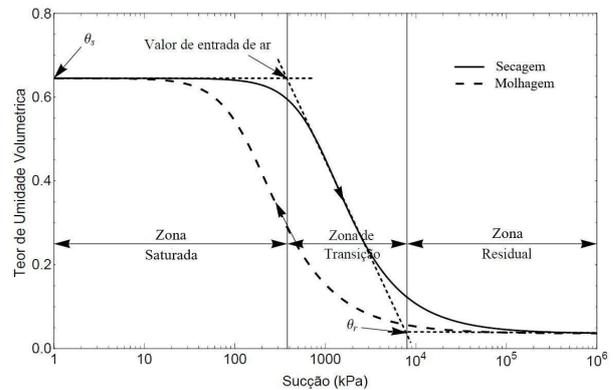


Figura 2. Zonas da curva de retenção de água no solo (Adaptado de Salinas, 2017).

2.6 Infiltração

A infiltração é o processo pelo qual a água penetra da superfície para o interior do solo, sendo influenciada pela quantidade de água disponível, as características do solo, o estado da superfície e as condições iniciais de umidade no solo. A precipitação é responsável por fornecer água à superfície do solo e a parcela que infiltra umedece gradualmente as camadas superficiais, alterando o perfil de umidade. Quando a precipitação e a infiltração cessam, o perfil de umidade no solo é modificado, com a água se deslocando para camadas mais profundas ou sendo transferida para a atmosfera por meio da evapotranspiração (Silveira et al., 2007).

O conceito de capacidade de infiltração refere-se à habilidade do solo em absorver água através de sua superfície, enquanto a taxa de infiltração representa a quantidade real de água que penetra no solo quando há água disponível para infiltrar, sendo definida por:

$$f = \frac{\partial F}{\partial t} \quad (6)$$

em que f é a taxa de infiltração [LT⁻¹] e F é a infiltração acumulada [L].

Quando a intensidade da precipitação iguala ou excede a capacidade de infiltração do solo, a taxa de infiltração atinge seu limite, resultando em um escoamento superficial conhecido como lâmina de

água (Horton, 1933). No entanto, o processo de infiltração é mais complexo do que parece, sendo influenciado por diversos fatores, como a presença de cobertura vegetal, a inclinação do terreno, o estado de compactação da superfície do solo e o teor de umidade da camada subsuperficial (Blight, 1997), bem como pelo grau de saturação e pela presença ou ausência da fase gasosa.

A estimativa da taxa de infiltração pode ser realizada por meio de modelos empíricos ou teóricos. Nos modelos empíricos, os parâmetros são derivados a partir de dados experimentais e não possuem uma fundamentação física intrínseca.

2.7 escoamento Superficial

Dentro do balanço hídrico, o volume total de precipitação não se converte integralmente em infiltração ou escoamento superficial. Em áreas com cobertura vegetal, parte da precipitação é interceptada antes de chegar ao solo e é posteriormente devolvida à atmosfera por meio da evapotranspiração. Quando a superfície tem uma temperatura superior à da chuva, parte da precipitação evapora assim que atinge o solo ou logo acima dele (Blight, 1997). Na ausência dessas condições, a parcela da precipitação total que se transforma em escoamento superficial pode ser calculada.

$$P_e(T) = p - f(t) \quad (7)$$

onde P_e é a precipitação efetiva [m/min].

A evolução do escoamento superficial é representada por hidrogramas, gráficos que relacionam a vazão e o tempo. Esses hidrogramas podem ser divididos em três regiões principais: ascensão, pico e recessão, conforme Figura 3.

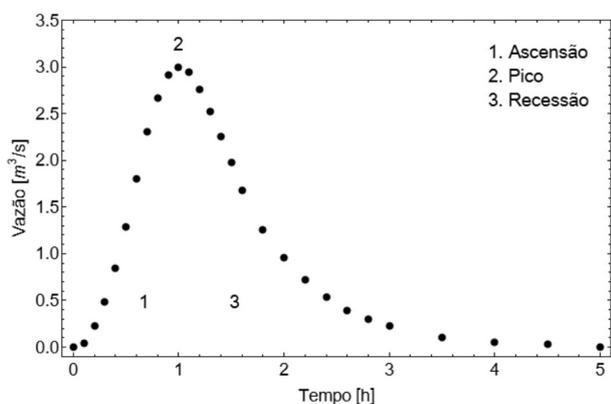


Figura 3. Evolução do escoamento superficial.
 Fonte: Martins (2022).

Nesse aspecto, a região de ascensão representa o início do escoamento superficial provocado pela precipitação. Já na região do pico, esse escoamento atinge seu valor máximo e ocorre uma mudança na tendência devido à diminuição da intensidade da chuva.

2.8 Carregamento de sedimentos

A fase inicial da erosão hídrica é desencadeada pelo impacto das gotas de chuva e ocorre antes do início do escoamento superficial. Esse impacto provoca a desagregação das partículas superficiais, que são então transportadas por meio de salpicos (splashing). A energia cinética é o principal fator que influencia a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva (Fernández-Raga et al., 2017), e a erosividade da chuva está diretamente relacionada com a intensidade e a duração da precipitação, o diâmetro das gotas, a orientação e a velocidade do impacto, bem como a qualidade da água da chuva (Bertoni e Lombardi Neto, 2005).

A descarga de sedimentos devido ao impacto das gotas de chuva pode ser calculada usando fórmulas empíricas (Bennett, 1974). Se a distribuição da precipitação for uniforme na área de interesse, a taxa de transporte de sedimentos é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade da precipitação:

$$S_R = \frac{c_R P^2}{p_d} \quad (8)$$

onde S_R é taxa de carregamento de sedimentos por impacto de gotas de chuva, c_R é a constante de calibração da erosão por impacto de gotas de chuva e p_d é a massa específica seca do solo.

Na erosão laminar, a taxa de transporte de sedimentos pelo escoamento superficial é frequentemente estimada em termos da tensão de cisalhamento crítica. Essa tensão crítica é definida como o valor a partir do qual o escoamento se torna capaz de transportar partículas sólidas. Utilizando a diferença entre a tensão de cisalhamento hidráulica e a tensão de cisalhamento crítica, denominada excesso de tensão de cisalhamento, a taxa de transporte de sedimentos pode ser estimada da seguinte forma:

$$s_e = K_e (\tau - \tau_c) \quad (9)$$

em que s_e é a taxa de carreamento de sedimentos por escoamento, K_e é o coeficiente de erodibilidade, τ é a tensão de cisalhamento hidráulica, τ_c é a tensão de cisalhamento crítica.

3. ERODIBILIDADE DO SOLO

A condução de experimentos para quantificar a erodibilidade do solo e a erosividade da chuva tem um papel crucial na pesquisa sobre erosão hídrica. Os ensaios com simuladores de chuva fornecem dados essenciais para a calibração e validação de modelos físico-matemáticos (Aksoy e Kavvas, 2005), que são desenvolvidos com o objetivo de entender a formação e a evolução dos processos erosivos.

3.1. Ensaio com Simulador de Chuva

Os simuladores de chuva, Figura 4, são instrumentos que possibilitam a reprodução de uma variedade de fenômenos, incluindo a compactação do solo devido ao impacto de gotas de chuva de diferentes tamanhos, processos erosivos, transporte de sedimentos e contaminantes, bem como a estabilidade de taludes. Além disso, eles são utilizados para avaliar o escoamento superficial e a infiltração de água no solo (Mendes et al., 2021). Esses dispositivos desempenham um papel fundamental na pesquisa relacionada à erosão hídrica e processos associados.



Figura 4. Aparelho Simulador de Chuva
Fonte: Merabet (2022).

Para reproduzir eventos de precipitação sob condições controladas, os simuladores de chuva, também conhecidos como infiltrômetros de aspersão, são utilizados. Em comparação com experimentos de campo, os ensaios com simuladores de chuva em laboratório oferecem diversas vantagens, como: redução de custos, menor duração dos experimentos, controle aprimorado das condições, repetibilidade

sob condições idênticas e facilidade de operação (Guerra, 1991; Morgan, 2005).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais obtidos foram confrontados com as soluções analíticas derivadas do modelo de onda cinemática para o escoamento superficial e das equações citadas anteriormente. O resultado desse confronto revelou uma notável concordância entre o padrão previsto pelo modelo físico-matemático e o comportamento efetivamente registrados.

O padrão exibido pelo modelo físico-matemático mostrou-se adequado ao comportamento observado nos dados experimentais: há um aumento inicial de descarga por unidade de área seguido pela sua estabilização no regime estacionário, enquanto a lâmina acumulada apresenta tendência de crescimento linear até o fim do evento de precipitação.

A descarga por unidade de área e a lâmina acumulada são superestimadas pelo modelo quando comparadas aos dados experimentais. As Figuras 5 e 6 representam a perda de solo para o experimento A1 e A2, respectivamente.

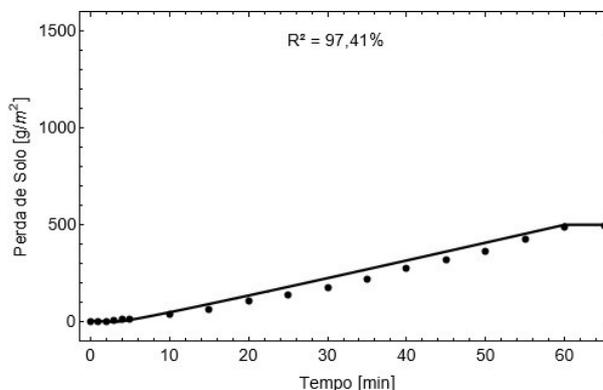


Figura 5. Perda de Solo - Ensaio A1.

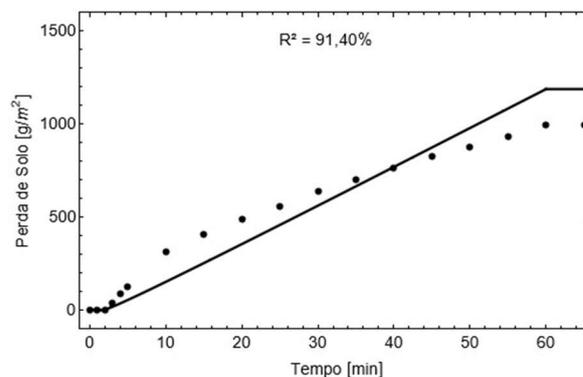


Figura 6. Perda de Solo - Ensaio A2.

Nas Figuras 7 e 8, podemos observar a representação gráfica do modelo em comparação com os dados experimentais, focando na taxa de carregamento de sedimentos.

Da mesma forma, o comportamento previsto pelo modelo para a perda de solo espelha o padrão apresentado pela lâmina acumulada, caracterizando um aumento linear da perda de solo até o término do evento de precipitação. No entanto, os dados não se adequaram de forma consistente, obtendo valores de R^2 pouco satisfatórios

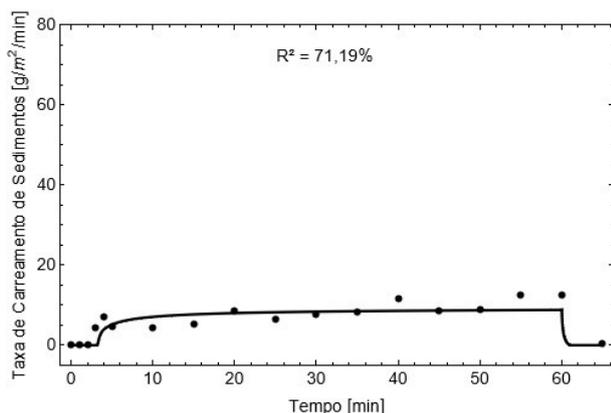


Figura 7. Taxa de Carregamento de Sedimentos - Ensaio A1.

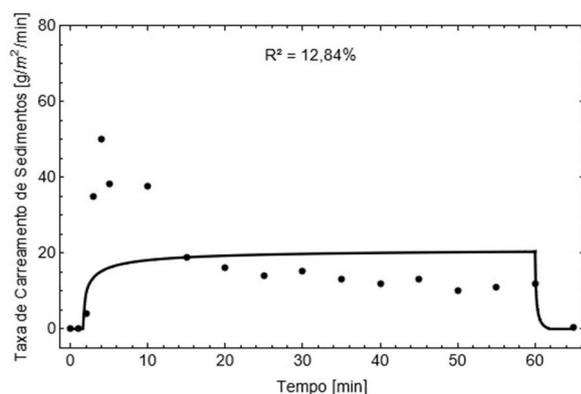


Figura 8. Taxa de Carregamento de Sedimentos - Ensaio A2.

Para resolver essa limitação do modelo, sugere-se, a mesma solução de Martins (2022), que se baseia em substituir a constante de calibração da erosão por impacto de gotas de chuva por um parâmetro variável no tempo. Dessa forma, a parcela da erosão por impacto de gotas de chuva se tornaria nula após certo período, e a erosão hídrica seria descrita apenas pela erosão laminar. Um estudo conduzido por Oliveira et al. (2021) demonstrou como o coeficiente de erodibilidade de um solo laterítico diminui ao longo do tempo.

Nos ensaios secos, não foi observada a mesma oscilação nos minutos iniciais. Portanto, a taxa de

carreamento de sedimentos é melhor representada pelo modelo nos ensaios secos ($R^2 > 0,7$) do que nos ensaios úmidos ($0,1 < R^2 < 0,5$). Vale ressaltar que o modelo antecipa o estabelecimento do patamar em relação aos dados experimentais, assim como ocorre no modelo da descarga por unidade de área.

Os resultados experimentais coletados durante os ensaios revelaram a ocorrência de um pico na taxa de carregamento de sedimentos por volta dos cinco minutos de chuva, principalmente no ensaio realizado com inclinação de 15 graus. Esse pico sugere que o desprendimento inicial de partículas sólidas é devido ao impacto das gotas de chuva. À medida que o escoamento superficial se estabelece, este se torna o mecanismo predominante para o desprendimento de partículas sólidas, levando a uma diminuição na taxa de carregamento de sedimentos até a estabilização em um patamar. Essas observações reforçam a importância de considerar os efeitos do impacto das gotas de chuva no processo de erosão e destacam a complexidade desse fenômeno, conforme discutido em estudos anteriores por diversos pesquisadores, como Wang et al. (2006) entre outros.

Além disso, para os outros resultados estudados previamente por Martins (2022), O comparativo entre o modelo da lâmina acumulada e a lâmina acumulada obtida nos ensaios com simulador de chuva após 60 minutos é mostrado na Figura 9.

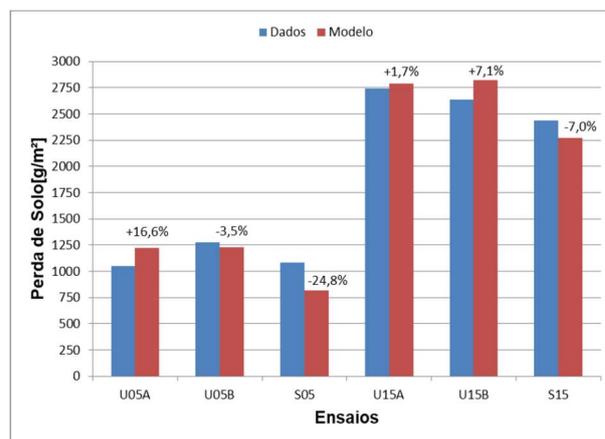


Figura 9. Comparação entre dados experimentais e modelo da lâmina acumulada.

Fonte: Martins (2022).

A análise comparativa entre o modelo físico-matemático e os dados experimentais revelam uma maior precisão para a perda de solo, caso da Figura 5 e Figura 6. A variação da perda de solo no modelo foi maior do que nos dados reais, mas manteve uma relação consistente, onde a perda no ensaio de 5

graus de inclinação corresponde a cerca de 75% da perda nos ensaio de 15 grau, tanto no modelo quanto nos dados experimentais. Isso sugere que o modelo tem um desempenho mais consistente na previsão da perda de solo em diferentes condições de inclinação, enquanto a estimativa da lâmina acumulada pode ser aprimorada para refletir com maior precisão os resultados observados.

5. CONCLUSÃO

Foi utilizado o modelo físico-matemático desenvolvido por Martins e Cavalcante (2022) para estudar a erosão hídrica em bordas de reservatórios, considerando eventos de precipitação com intensidade constante. Dessa forma, esse modelo oferece soluções analíticas para o escoamento superficial em taludes inclinados e para a equação da continuidade do transporte de sedimentos.

A validação do modelo foi realizada com ensaios experimentais usando amostras de solo da UHE Itumbiara, variando a inclinação do terreno, o teor inicial de umidade e o índice de vazios do solo. Os resultados indicaram boa concordância entre o modelo e os dados experimentais, com R^2 superior a 0,91 para perda de solo. No entanto, foram encontrados valores de R^2 entre 0,1 e 0,75 para taxa de carregamento de sedimentos.

Ao analisar os dados da taxa de carregamento de sedimentos, foi identificada a necessidade de incorporar um parâmetro variável no tempo para melhor representar a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva, tal como referido anteriormente no trabalho de Martins (2022).

Esses resultados destacam a eficácia do modelo de Martins e Cavalcante (2022) e sua importância na compreensão e gestão da erosão hídrica em bordas de reservatórios, enfatizando a necessidade de considerar o impacto das gotas de chuva.

Para estudos subsequentes, recomenda-se uma abordagem mais abrangente na validação do modelo físico-matemático. Isso envolve a utilização de dados provenientes de ensaios com simuladores de chuva com maior repetibilidade e variação nas intensidades de precipitação. Além disso, é fundamental considerar outros métodos de obtenção do coeficiente de erodibilidade e da tensão de cisalhamento crítica, como o ensaio de Inderbitzen, para enriquecer as bases de dados e aprimorar a precisão do modelo.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 306975/2023-8), pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF Projeto 00193-00001609/2023-44). Agradecemos também à Rocscience pela licença do *software*.

REFERÊNCIAS

- Aksoy, H., & Kavvas, M. L. (2005). A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, 64(2-3), 247-271.
- Bennett, J. P. (1974). Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10(3), 485-492.
- Bertoni, J. C., & Tucci, C. E. M. (2007). Precipitação. In *Hidrologia: ciência e aplicação*, 5, 177-241.
- Blight, G. E. (1997). Interactions between the atmosphere and the earth. *Géotechnique*, 47(4), 715-767.
- Borma, L. S., Gitirana Jr., G. F. N., & Luiz, G. C. (2015). Interação solo-planta-atmosfera e o papel dos solos não saturados. In *Solos não saturados no contexto geotécnico*, 13, 327-365.
- Cavalcante, A. L. B., & Zornberg, J. G. (2017). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. I: Analytical solutions. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 04017013.
- Costa, M. B. A., & Cavalcante, A. L. B. (2021). Bimodal Soil-Water Retention Curve and k-Function Model Using Linear Superposition. *International Journal of Geomechanics*, 21(7), 04021116.
- Durner, W. (1992). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity using multi-porosity water retention curves. In *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*, 185-202.
- Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblois, E., & Flahaut, B. (2012). Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale. *Journal of Hydrology*, 430, 162-172.
- Eletrobras, C. E. B. (2003). Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro.
- Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., & Cerdà, A. (2017). Splash erosion: A review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews*, 171, 463-477.
- Guerra, A. J. T. (1991). Soil characteristics and erosion, with particular reference to organic matter content. PhD thesis, University of London.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446-460.
- Lu, N., & Nikos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*.

John Wiley & Sons.

- Luiz, G. C. (2012). Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – Município de Goiânia-GO. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246 p.
- Martins, M. M. (2022). Modelagem físico-matemática da interação solo-atmosfera e erosão hídrica em bordas de reservatório.
- Mendes, T. A., Pereira, S. A. S., Rebolledo, J. F. R., Gitirana Jr., G. F. N., Melo, M. T. S., & Luz, M. P. (2021). Development of a rainfall and runoff simulator for performing hydrological and geotechnical tests. *Sustainability*, 13(6), 3060.
- Merabet Jr., J. C. F. (2022). Estudo da erodibilidade de um solo tropical devido à precipitação e escoamento superficial. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.
- Oliveira, V. N., Gitirana Jr., G. F. N., Mascarenha, M. M. A., Sales, M. M., Varrone, L. F. R., & Luz, M. P. (2021). An Enhanced Flume Testing Procedure for the Study of Rill Erosion. *Water*, 13(21), 2956.
- Salinas, E. J. C. (2017). Modelagem e Simulação de Ensaios Laboratoriais de Contaminação em Rejeitos em Condição não Saturada. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.
- Silveira, A. L. L., Louzada, J. A., & Beltrame, L. F. (2007). Infiltração e armazenamento no solo. In *Hidrologia: ciência e aplicação*, 9, 335-372.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., & Pufahl, D. E. (1999). The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, 49(2), 143-159.
- Wang, A., Jin, C., Liu, J., & Pei, T. (2006). A modified Hortonian overland flow model based on laboratory experiments. *Water resources management*, 20(2), 181-192.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.