



## Desenvolvimento de metodologia para estimativa de velocidade do transporte de sedimentos em um escoamento raso

Alexandre Silveira<sup>1</sup>, Rogério Magalhães Coelho<sup>2</sup>, Lucas José Avelino<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus Poços de Caldas, E-mail: [alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br](mailto:alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br),

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alfenas (Unifal-MG), Campus Poços de Caldas e-mail: [rogerio.coelho@sou.unifal-mg.edu.br](mailto:rogerio.coelho@sou.unifal-mg.edu.br) <sup>3</sup>Universidade Federal de Alfenas (Unifal-MG), Campus Poços de Caldas, e-mail: [lucas.avelino@sou.unifal-mg.edu.br](mailto:lucas.avelino@sou.unifal-mg.edu.br)

Artigo recebido em 17/05/2024 e aceito em 27/10/2024

### RESUMO

A gestão eficiente da água urbana é crucial frente à urbanização acelerada e mudanças climáticas, que impactam a qualidade e disponibilidade de recursos hídricos. Este estudo investiga o potencial da termografia infravermelha para analisar escoamento superficial e transporte de sedimentos em ambientes urbanos, contribuindo para uma melhor gestão dos sistemas de drenagem. Utilizou-se um sistema experimental de fluxo raso, com uma plataforma ajustável e uma câmera termográfica FLIR A50 para capturar imagens térmicas dos sedimentos aquecidos em movimento. Foram testadas duas granulometrias de areia sob duas vazões diferentes. A velocidade dos sedimentos foi calculada a partir das manchas térmicas nas imagens, utilizando software de rastreamento e análise estatística para determinar as incertezas. Os dados mostraram que a técnica de termografia infravermelha é eficaz para medir a velocidade dos sedimentos transportados. As velocidades obtidas variaram conforme as vazões, sendo maiores para a maior vazão (Q2). A granulometria dos sedimentos não apresentou interferência significativa na velocidade medida. As incertezas associadas às velocidades foram menores nos intervalos de medição mais amplos. A termografia infravermelha provou ser uma ferramenta valiosa e precisa para estudar a dinâmica do escoamento superficial e transporte de sedimentos em áreas urbanas. Os resultados fornecem insights para o desenvolvimento de estratégias de gestão de águas pluviais mais eficazes e sustentáveis.

Palavras-chave: termografia, escoamento superficial, transporte de sedimentos, urbanização, gestão de recursos hídricos.

## Development of a methodology for estimating sediment transport velocity in a shallow flow

### ABSTRACT

Efficient urban water management is crucial in the face of rapid urbanization and climate change, which impact the quality and availability of water resources. This study investigates the potential of infrared thermography to analyze surface runoff and sediment transport in urban environments, contributing to better drainage system management. An experimental shallow flow system was used, featuring an adjustable platform and a FLIR A50 thermal camera to capture thermal images of heated sediments in motion. Two sand granulometries were tested under two different flow rates. Sediment velocity was calculated from thermal spots in the images, using tracking software and statistical analysis to determine uncertainties. The data showed that infrared thermography is effective in measuring the velocity of transported sediments. The obtained velocities varied with the flow rates, being higher for the larger flow rate (Q2). Sediment granulometry did not significantly affect the measured velocity. Uncertainties associated with velocities were smaller in wider measurement intervals. Infrared thermography proved to be a valuable and precise tool for studying surface runoff and sediment transport dynamics in urban areas. The results provide insights for developing more effective and sustainable stormwater management strategies.

Keywords: thermography, surface runoff, sediment transport, urbanization, water resource management.

## Introdução

Historicamente a sociedade está diretamente ligada ao uso da água, seja para abastecimento público, irrigação agrícola, geração de energia, uso industrial, entre outros usos. Problemas relacionados à qualidade e quantidade de água prejudicam o bem-estar social e o desenvolvimento humano e podem estar ligados, entre outros, à falta de um planejamento adequado da gestão de recursos hídricos.

Em meios urbanos, a impermeabilização do solo acarreta um aumento da parte da precipitação que escoar sobre a superfície, o escoamento superficial. Esse aumento, além de problemas de sobrecarga no sistema de drenagem urbana, acarretando alagamentos, também é uma fonte significativa de poluição para os corpos hídricos, já que transporta poluentes gerados pelo meio urbano para os corpos receptores.

A expansão urbana, desordenada, caracterizada pela elevada impermeabilização do solo e a remoção da vegetação natural, resulta em alterações significativas nos padrões de escoamento superficial e na qualidade da água dos corpos hídricos urbanos (Guo et al., 2025). O aumento da área impermeável diminui a capacidade do solo em reter água, aumentando assim o volume e a velocidade do escoamento superficial durante eventos de precipitação (Ren et al., 2024)

Uma adequada gestão das águas urbanas é crucial diante dos desafios impostos pela intensa urbanização e pelas aceleradas mudanças climáticas globais (Li et al., 2024). A interação complexa entre os sistemas naturais e as atividades antrópicas nas áreas urbanas requer uma abordagem integrada e desafiadora para garantir a disponibilidade e minimizar os impactos dos desastres naturais cada vez mais frequentes (Liu et al., 2025)

Com o aumento da impermeabilização, a rápida drenagem de águas pluviais sobrecarrega os sistemas de drenagem urbana, resultando em inundações recorrentes, erosão do solo e transporte de poluentes para os corpos d'água receptores (Ferdowsi et al., 2024). A qualidade da água é comprometida pela carga de contaminantes, incluindo sedimentos, metais pesados, nutrientes e substâncias orgânicas, que são lavados das superfícies urbanas e depositados nos cursos d'água (Cojoc et al., 2024; Zhang et al., 2022).

As mudanças climáticas exacerbam esses impactos, aumentando a frequência e intensidade

de eventos extremos de precipitação e prolongando períodos de seca, desafiando ainda mais a resiliência dos sistemas de gestão de águas urbanas (AlZaatiti et al., 2025). Nesse contexto, a compreensão detalhada dos processos de escoamento superficial e transporte de sedimentos em ambientes urbanos torna-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e adaptação (Xue et al., 2025).

Os escoamentos em baixas lâminas de água, denominados fluxos rasos, podem ocorrer em bacias naturais e urbanizadas, e a sua caracterização é importante para a modelação do escoamento, da erosão e da qualidade da água.

Escoamentos em meios urbanos, ocorrem em superfícies impermeáveis e, em alguns casos, são caracterizados por baixas lâminas líquidas (*shallow flows*) com transporte generalizado de sedimentos. Técnicas tradicionais de medição de velocidade do escoamento e transporte de sedimentos, por exemplo, não se aplicam aos escoamentos rasos devido a dificuldade imposta pela intrusão de instrumentos em baixas lâminas.

As técnicas de medição da velocidade do escoamento variam de acordo com a dimensão do corpo d'água, sua acessibilidade e características. Recentemente foram feitos grandes desenvolvimentos na tecnologia de detecção, resultando em um amplo espectro de opções poderosas e versáteis para dados de velocidade de fluxo de alta precisão. Contudo, os dispositivos de medição podem ter algumas limitações quando operam fora das suas condições ideais de medição. Particularmente para fluxos rasos, a caracterização dos campos de velocidade é complicada, principalmente devido à sua falta de profundidade para inserção de instrumentos e outros problemas, como a variabilidade do leito do canal devido à erosão, presença de sedimentos e outros detritos no fluxo ou mesmo presença de vegetação ocultando a área de medição. Isto restringe o uso de muitos dispositivos de medição de vazão

As dificuldades para a realização de trabalhos em campo são fatores importantes a serem considerados. De acordo com Lima (2017), em bacias urbanas, a dificuldade operacional, a imprevisibilidade da ocorrência ou não de precipitação e magnitude de área de controle, entre outros, são fatores que dificultam o monitoramento em escala real e algumas das alternativas podem ser o uso de modelos físicos reduzidos, os simuladores de chuva e escoamento em escala laboratorial.

Os estudos hidrológicos realizados em campo comumente são trabalhosos, requerem

muito esforço e recursos financeiros, sendo que o alto custo para realização de experimentos em campo muitas vezes acaba inviabilizando determinados projetos.

De acordo com Pessoti (2018), o uso de simuladores de chuva e escoamento para estudos sobre comportamento da precipitação-escoamento e transporte de material aumentou por conta da dificuldade de coleta de dados em ambientes urbanizados e também à sua maior facilidade, redução de custo, agilizando e otimizando a coleta de dados. Felice (2017) diz que em escalas de laboratório, há algum tempo que os modelos físicos e simuladores de chuva obtêm êxito no estudo do comportamento do processo de chuva-escoamento e, ultimamente, também têm obtido sucesso em trabalhos sobre a dinâmica do transporte de sedimentos e poluentes no escoamento superficial.

Diante desses desafios, este estudo propõe explorar o potencial das técnicas termográficas (não intrusiva) como uma ferramenta inovadora para investigar o escoamento superficial e o transporte de sedimentos em escoamentos rasos, típicos em ambientes urbanos. Ao integrar informações óticas e térmicas, essas técnicas oferecem uma abordagem não intrusiva e abrangente para caracterizar a dinâmica hidrosedimentológica em tempo real, permitindo uma melhor compreensão dos processos físicos subjacentes.

Este estudo busca avançar o conhecimento científico sobre a interação entre o ambiente urbano e os recursos hídricos, fornecendo a técnica termográfica como uma alternativa de investigação valiosa para o planejamento e gestão sustentável dos sistemas de drenagem e qualidade da água em áreas urbanas. Ao desenvolver uma metodologia robusta de aquisição e análise de dados termográficos, pretende-se contribuir para o avanço da pesquisa nesse campo e promover práticas de engenharia ambiental mais eficientes e sustentáveis.

A termografia por infravermelho é uma área do conhecimento bastante utilizada em estudos hidrológicos, porém seu uso na identificação de características do escoamento superficial é recente. Consiste em uma técnica onde é possível obter imagens e medir a energia infravermelha emitida ou refletida por uma superfície. A termografia por infravermelho baseia-se no fenômeno físico de que todo objeto, com temperatura acima de zero absoluto (-273,15 °C), emite radiação eletromagnética oriunda da excitação das moléculas que o constituem. A maior excitação molecular se dá com maior temperatura,

ocasionando uma maior intensidade na radiação emitida. Essa radiação pode ser descrita por duas características; comprimento de onda e intensidade. Ambos os parâmetros estão relacionados por leis da física relativamente simples, relacionadas à temperatura da superfície do objeto. Portanto, é possível usar a intensidade e o comprimento de onda da radiação emitida por um objeto para medir sua temperatura superficial sem a necessidade de contato físico.

A radiação térmica, um tipo de radiação eletromagnética, pode ser emitida nas faixas de visível, ultravioleta, infravermelho e possivelmente na faixa de micro-ondas do espectro eletromagnético da luz. A radiação infravermelha se localiza, dentro do espectro eletromagnético, entre a região da luz visível e da radiação de micro-ondas.

A termografia tem sido utilizada na hidrologia para medição de diversas variáveis. Tauro e Grimaldi (2017) utilizaram uma câmera infravermelha para rastrear partículas térmicas (cubos de gelo) para monitorar velocidade superficial do fluxo. (Montenegro et al., 2023) realizaram estimativa da umidade e da condutividade hidráulica não saturada da camada superficial do solo, utilizando a termografia por infravermelho. Um traçador térmico foi utilizado para estimar velocidades de escoamento cujos resultados foram comparados com sucesso por um modelo de transporte (Abrantes et al., 2019). (De Lima & Abrantes, 2014) demonstraram a viabilidade de se estimar o microrelevo e a morfologia em sulcos no solo. (Abrantes et al., 2018) utilizaram um traçador triplo (térmico, cloreto de sódio e corantes) para determinar a velocidade do escoamento em um canal hidráulico.

A velocidade do fluxo é uma propriedade hidráulica básica dos fluxos de superfície e seu cálculo preciso é necessário para modelos hidrológicos baseados em processos, como erosão do solo e modelos de desenvolvimento de sulcos (Montenegro, 2013). Lima (2014) apresenta uma nova técnica para estimar o microrrelevo da superfície do solo e a morfologia dos sulcos presentes usando termografia por infravermelho. Pfister (2012) concluiu que um grande desafio para a hidrologia no futuro próximo será aplicar com mais frequência abordagens multidisciplinares, de modo a encontrar soluções criativas que nos permitam eventualmente afastar-nos do 'imagens monocromáticas da realidade', e 'ver as captações em cores'. De acordo com Meola (2004), a termografia infravermelha transforma a energia térmica, emitida por objetos na faixa infravermelha

do espectro eletromagnético, em uma imagem visível. Castanedo (2013) destaca que a termografia infravermelha tem recebido grande e crescente atenção para diagnóstico e monitoramento nas últimas décadas, tornando-se uma técnica de teste não destrutivo (NDT) valiosa.

A hipótese deste trabalho é verificar se é possível estimar a velocidade de transporte de sedimentos em escoamentos rasos utilizando a termografia. Deste modo, o trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para a determinação da velocidade do transporte de sedimentos utilizando termografia por infravermelho.

### **Metodologia**

Para a realização dos testes laboratoriais, foi utilizado um sistema montado para simular as condições de um escoamento superficial de fluxo raso (*shallow flow*).

Essa estrutura consiste em uma base metálica, com altura a jusante e a montante, respectivamente, de 1,10 e 1,50 metro, com declividade ajustável, sob uma base de acrílico. A plataforma de acrílico apresenta as dimensões de 3,50 metros de comprimento, 30 cm de largura e uma espessura do acrílico de 0,9 cm. As laterais da estrutura, também de acrílico, apresentam 30 cm de altura. Na parte superior da estrutura se encontra um tanque que receberá o fluxo oriundo da bomba, esse tanque, quando cheio, verte uniformemente para o canal, possibilitando a simulação de um escoamento de baixa lâmina e.

Uma estrutura de calhas instalada no final da plataforma de acrílico permite recolher a água escoada para realização de testes de vazão via método direto. Foi montado um sistema que permite tanto a recirculação da água quanto seu descarte.

Na lateral do protótipo foi colocada uma escala para servir de referência de distância às imagens coletadas durante o experimento. Com essa escala e com as medições de tempo poderão ser aferidas as velocidades dos escoamentos e carreamento de sedimentos.

O sistema hidráulico que alimenta o protótipo, consiste em um reservatório de 500 litros, abastecida pela rede de distribuição e água municipal. Uma bomba hidráulica acoplada a um filtro, com a finalidade de proteger a bomba e garantir que não haja outros tipos de sedimentos nos testes. O sistema é alimentado por meio de tubos de PVC com ½” de diâmetro.

Na saída da bomba foi inserido um manômetro digital do modelo, que afere a pressão interna do sistema, possibilitando a construção de uma curva que relacione essa pressão com a vazão medida no final, garantindo que os testes ocorram de maneira uniforme.

Após o manômetro, foi fixado um registro de pressão que permite variar e controlar a vazão e a pressão do sistema, sendo assim possível encontrar quais as condições ideais para a realização dos experimentos finais. A Figura 1 a seguir apresenta um croqui da vista lateral e vista superior da bancada de testes.

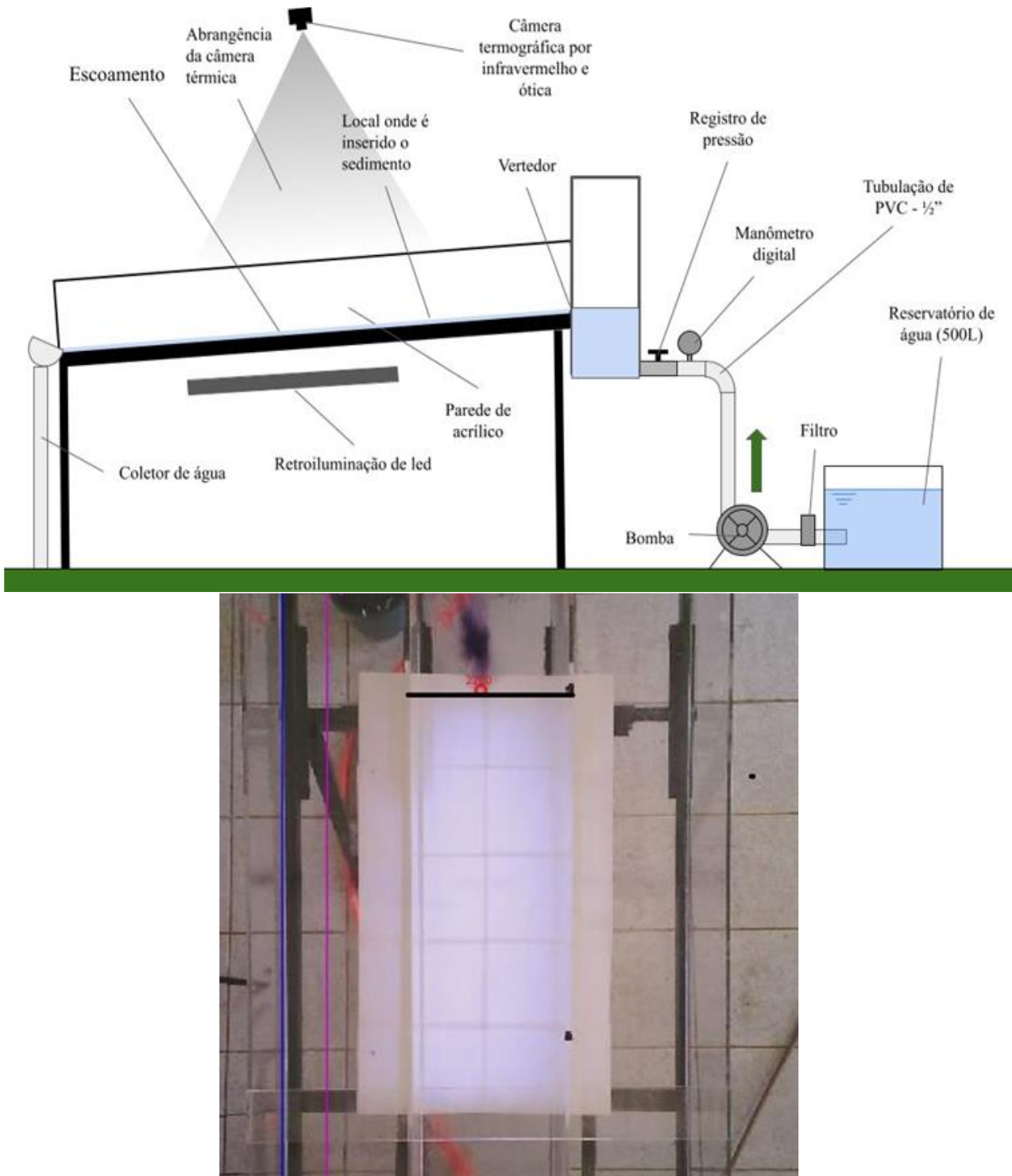


Figura 1: Vista lateral e vista superior da superfície de testes (Fonte: do autor)

A câmera termográfica utilizada foi uma FLIR A50. A câmera foi instalada a uma altura de 3 m da superfície do canal, com ângulo de filmagem perpendicular ao mesmo, o que resultou em uma amplitude padronizada de 0,79 m para as imagens térmicas, dimensões estas na direção em que ocorre o escoamento.

O sedimento utilizado nos testes foi areia de construção comum, peneirada em laboratório, separando diversas faixas de granulometria. Para

os ensaios foram utilizadas as faixas granulométricas, de < 0,6 mm (G1-areia fina) e de 0,6 mm a 1,18 mm (G2 - areia grossa).

Foram utilizadas duas vazões, Q1 e Q2, de magnitude 0,50 l/s e 0,73 l/s respectivamente, (determinadas por meio do método direto de medição de vazões), com uma inclinação do canal de 5 %.

Foram vertidos manualmente no escoamento, 5 g de sedimentos aquecidos a 200

graus Celsius, variando entre as duas granulometrias (G1 e G2) a 0,3 m do vertedor do canal, para as duas vazões (Q1 e Q2). Essas condições foram obtidas dos ensaios preliminares.

Para as imagens térmicas obtidas dos sedimentos aquecidos foram levados em consideração as velocidades dos centroides das manchas térmicas. Para a determinação dos pontos correspondentes aos centroides, foram estabelecidos, além dos pontos correspondentes às frentes (primeiro ponto identificável acima da

temperatura do escoamento), um outro ponto na parte posterior de cada mancha (cauda), utilizando o mesmo critério de se identificar o primeiro pixel acima da temperatura do escoamento. Os pontos equivalentes aos centroides foram encontrados dividindo as distâncias entre os pontos obtidos na frente e na cauda da mancha por 2.

As variações entre as características dos parâmetros envolvidos nos experimentos foram nomeadas conforme a Tabela 1.

**Tabela 1** - Nomenclaturas e siglas adotadas para as velocidades analisadas.

Grandeza analisada	Nomenclatura adotada	Nomenclatura para Q1	Nomenclatura para Q2
Velocidade térmica do sedimento fino (G1)	Vtfc	VtfcQ1	VtfcQ2
Velocidade térmica do sedimento grosso (G2)	Vtgc	VtgcQ1	VtgcQ2

Todas as variações dos experimentos foram realizadas em triplicata, com intuito de atribuir robustez e validade estatística aos resultados.

As análises foram feitas medindo o tempo necessário para que o ponto fixado viajasse ao longo de três sessões (Figura 2). As seções

apresentavam 0,15 m de comprimento e se encontravam nas seguintes distâncias do ponto zero localizado no início da região de análise: Ponto 1: 0,20 m; Ponto 2: - 0,35 m; Ponto 3: - 0,50 m e Ponto 4 – 0,65 m. Todos os dados de tempo e espaço foram obtidos por meio do software *Tracker*®.

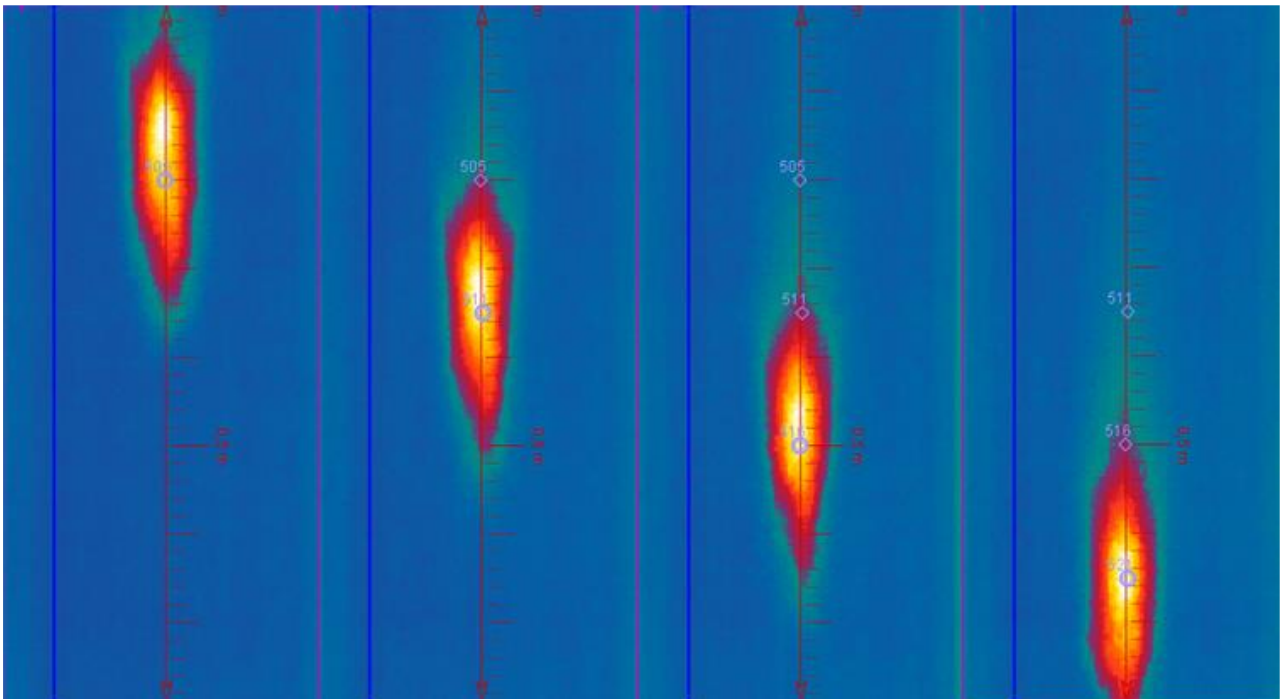


Figura 2 - Exemplo de imagens térmicas.

As incertezas associadas a cada velocidade (v) calculada foram propagadas com o uso do método das derivadas parciais, considerando as incertezas instrumentais das grandezas tempo (t) e espaço (x). Para o valor da incerteza relacionada ao tempo, foi utilizado a metade do valor de tempo entre cada frame do vídeo. Na resolução em que as imagens foram extraídas, esse valor corresponde a 0,015 segundo. Foi utilizado como incerteza das medidas espaciais a metade do valor do intervalo percorrido entre um frame da imagem e seu subsequente, com valor de aproximadamente 0,015 m (valor extraído dos experimentos com a vazão maior Q2).

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial t} \delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \delta x\right)^2} \quad (1)$$

Em que:

- $\delta v$  é a incerteza em v,
- $\delta t$  é a incerteza em t,
- $\delta x$  é a incerteza em x,
- $\partial v/\partial t$  é a derivada parcial de v, em relação a t,
- $\partial v/\partial x$  é a derivada parcial de v, em relação a x

As incertezas associadas aos valores correspondentes às médias das velocidades foram calculadas pelo método da incerteza padrão da

média, seguindo os princípios da propagação de incertezas, utilizando a fórmula que leva em consideração as incertezas individuais dos valores no conjunto.

$$\delta(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum(\delta x_i)^2}{n^2}} \quad (2)$$

Em que:

- $\delta x_i$  é a incerteza individual de cada dado,
- n é o número total de observações.

### Resultados

As imagens foram tratadas utilizando o software *Tracker* © a partir dos quatro pontos de distância fios (Figura 2). Para cada experimento foram obtidos seis valores de velocidade (V1 a V6), além do valor da média entre elas (V média), conforme apresentado na Tabela 2. Estas velocidades são resultado de todas as combinações possíveis entre os pontos, gerados pelos seis intervalos de medição (I1 a I6). A Tabela 2 a seguir descreve para cada velocidade seus respectivos pontos e intervalos. Estes dados passaram por tratamentos estatísticos para obtenção das incertezas associadas e absolutas para cada valor.

**Tabela 2** - Velocidades obtidas para cada experimento e seus respectivos pontos e intervalos.

Velocidade	Velocidade média entre os pontos:	Intervalo	Comprimento do intervalo (m)
V1	1 e 2	I1	0,15
V2	2 e 3	I2	0,15
V3	3 e 4	I3	0,15
V4	1 e 3	I4	0,30
V5	2 e 4	I5	0,30
V6	1 e 4	I6	0,45

Os intervalos que envolvem pontos subsequentes e apresentam comprimento de 0,15 m (I1 a I3) foram nomeados Intervalos Primários, os intervalos que apresentam comprimento de 0,30 m (I4 e I5) foram nomeados Intervalos Secundários e

os intervalos com comprimento de 0,45 m (I6) foram nomeados Intervalos Terciários.

As Tabelas 3 a 6 apresentam os resultados das velocidades calculadas para o transporte dos sedimentos fino e grosso para as duas vazões Q1 e Q2.

**Tabela 3** - Velocidades obtidas, centroide, sedimento fino, para Q1.

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12
V2	0,75	0,09	12	0,64	0,08	12	0,75	0,09	13
V3	0,75	0,09	12	0,75	0,09	13	0,64	0,08	12
V4	0,69	0,04	6	0,64	0,04	6	0,69	0,04	6
V5	0,75	0,05	6	0,69	0,04	6	0,69	0,04	6
V6	0,71	0,03	4	0,67	0,03	4	0,68	0,03	4
V média	0,72	0,03	4	0,67	0,03	4	0,68	0,03	4

**Tabela 4** – Velocidades obtidas, centroide, sedimento grosso, para Q1.

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12	0,64	0,08	12
V2	0,64	0,08	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	13
V3	0,75	0,09	13	0,75	0,09	12	0,64	0,08	12
V4	0,64	0,04	6	0,69	0,04	6	0,69	0,04	6
V5	0,69	0,04	6	0,75	0,05	6	0,69	0,04	6
V6	0,68	0,03	4	0,71	0,03	4	0,67	0,03	4
V média	0,67	0,03	4	0,72	0,03	4	0,68	0,03	4

**Tabela 5** – Velocidades obtidas, centroide, sedimento fino, para Q2.

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,90	0,12	13	0,90	0,12	13	0,75	0,09	12
V2	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13
V3	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V4	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6
V5	0,75	0,05	6	0,75	0,05	6	0,82	0,05	6
V6	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4
V média	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4	0,81	0,03	4

**Tabela 6** – Velocidades obtidas, centroide, sedimento grosso, para Q2.

Velocidade	Tréplica - 1			Tréplica - 2			Tréplica - 3		
	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)	V (m/s)	Inc. (±)	Inc. (%)
V1	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V2	0,75	0,09	12	0,90	0,12	13	0,75	0,09	13
V3	0,90	0,12	13	0,75	0,09	12	0,75	0,09	12
V4	0,75	0,05	6	0,82	0,05	6	0,75	0,05	6
V5	0,82	0,05	6	0,82	0,05	6	0,75	0,05	6
V6	0,79	0,03	4	0,79	0,03	4	0,75	0,03	4
V média	0,79	0,03	4	0,81	0,03	4	0,75	0,03	4

Devido à frequência de frames por segundo dos vídeos analisados, foram extraídos dados do frame onde o centroide da mancha encontra-se mais próxima do ponto de medição (P1 a P4) em relação aos frames anterior e posterior, isso acarretou algumas velocidades superestimadas e outras subestimadas para determinados Intervalos Primários, pois quando esse intervalo apresentava um frame a mais que a média de frames entre os pontos, o intervalo seguinte tendeu a apresentar um frame a menos, o que acarretou variações sistemáticas nos dados. Por exemplo: se em uma determinada análise os Intervalos Primários variam entre 5 ou 6 frames por intervalo, existirão somente

dois valores de velocidade associado a eles, uma respectiva a 5 frames, outra respectiva a 6 frames.

Conforme o grau do intervalo aumenta (Intervalos Secundários e Terciários), esse efeito tende a diminuir sua interferência, ou seja, quando esses intervalos são expandidos e as médias calculadas, os valores tendem a serem mais confiáveis. Quando o número de frames correspondente a um intervalo se manteve constante para todos os intervalos, os dados de velocidade se mantiveram equivalentes.

A Figura 3 a seguir apresenta as representações visuais das velocidades encontradas.

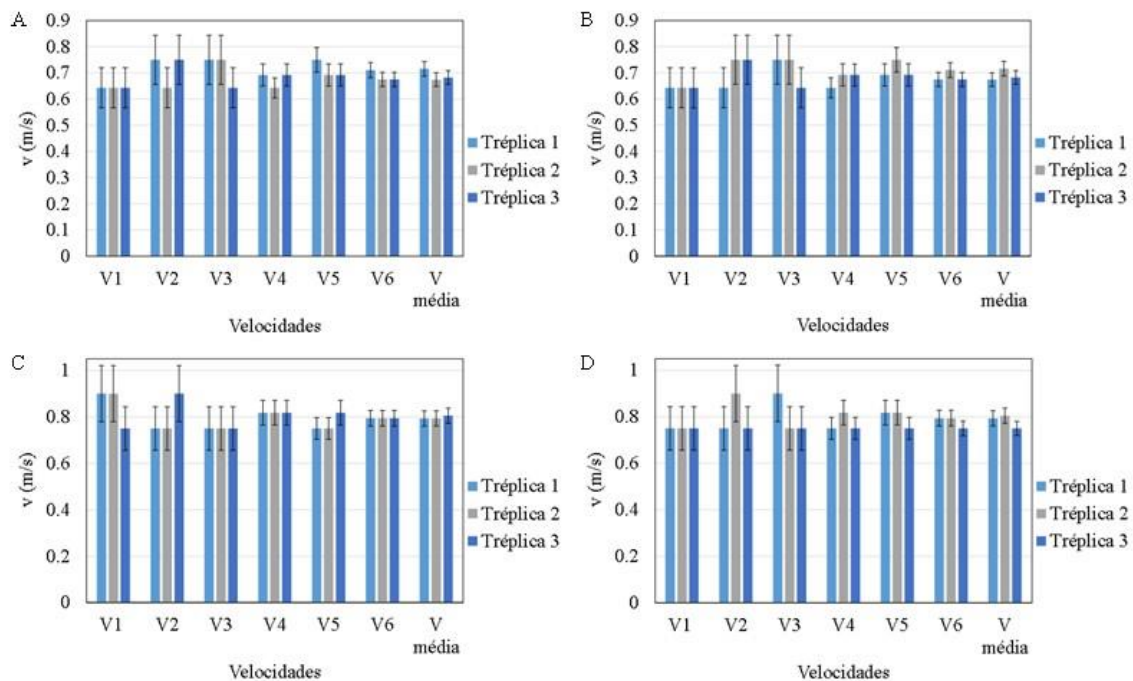


Figura 3: Velocidades térmicas (centroide):

A- sedimentos finos aquecidos para Q1.

B- sedimentos grossos aquecidos para Q1.

C- sedimentos finos aquecidos para Q2.

D- sedimentos grossos aquecidos para Q2.

Para este trabalho, foram consideradas as velocidades 6 (V6) oriundas de intervalos de medição terciários, as mais representativas, cujas incertezas associadas apresentaram menores

valores em comparação às demais velocidades e magnitudes semelhantes às médias entre todas as velocidades. Esses valores para cada repetição do experimento estão descritos na Tabela 7.

**Tabela 7** - valores de V6 e V6 médias

	V6			V6 média
	Tréplica 1	Tréplica 2	Tréplica 3	
<b>VtfcQ1</b>	0,711	0,675	0,675	0,687
<b>VtgcQ1</b>	0,675	0,711	0,675	0,687
<b>VtfcQ2</b>	0,794	0,794	0,794	0,794
<b>VtgcQ2</b>	0,794	0,794	0,750	0,779

Os valores dos desvios-padrão para cada V6 média estão representados na Tabela 8.

**Tabela 8** - valores do desvio padrão para as médias de V6

<b>VtfcQ1</b>		<b>VtgcQ1</b>	
<b>V6 média (m/s)</b>	<b>Desvio padrão (m/s)</b>	<b>V6 média (m/s)</b>	<b>Desvio padrão (m/s)</b>
0,687	0,021	0,687	0,021
<b>VtfcQ2</b>		<b>VtgcQ2</b>	
<b>V6 média (m/s)</b>	<b>Desvio padrão (m/s)</b>	<b>V6 média (m/s)</b>	<b>Desvio padrão (m/s)</b>
0,794	0,000	0,779	0,025

As comparações entre os valores de V6 médios e os valores de V6 para cada tréplica estão apresentados na Figura 4.

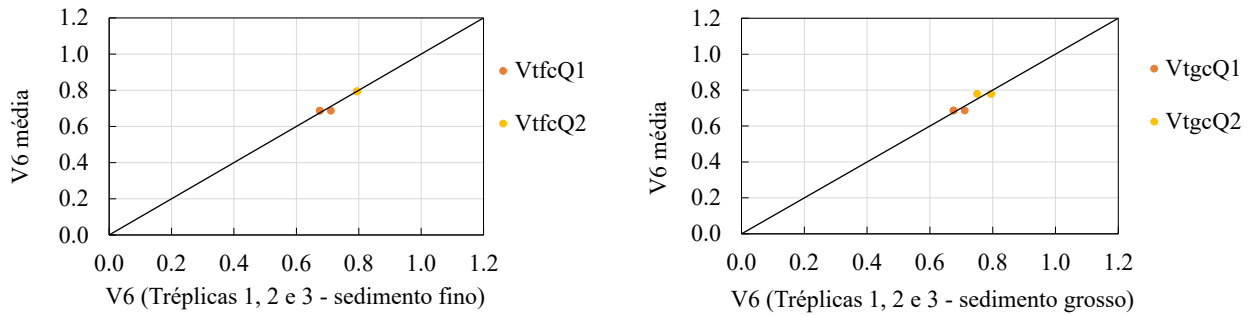


Figura 4: comparações entre os valores de V6 e seus valores médios.

## Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para a determinação da velocidade de escoamentos de baixa lâmina e a velocidade do transporte de sedimentos pelo mesmo utilizando de termografia por infravermelho. Foram realizados diversos ensaios laboratoriais com variadas técnicas de medição das velocidades envolvidas. Com isso, foi possível verificar a hipótese do trabalho e concluir que é possível estimar a velocidade do transporte dos sedimentos usando termografia.

A partir das imagens termográficas dos sedimentos em movimento, foram obtidos sete valores de velocidade para cada variação do experimento (V1 a V6 e a média entre elas), com suas respectivas incertezas, além do cálculo do desvio padrão entre os valores das três réplicas.

Com a análise das incertezas, foi observado que as velocidades 6 (V6) apresentaram um menor valor para a mesma, sendo essas consideradas as mais representativas do valor real, além dos valores de V6 se apresentarem muito semelhantes às médias calculadas entre todas as velocidades. Comparando os valores de V6 de cada réplica com suas respectivas médias, pode-se concluir que o comportamento do deslocamento dos sedimentos se deu como o esperado para cada vazão envolvida, com os valores para Q1 sendo menores que os valores para Q2.

Um padrão foi observado ao se comparar as técnicas ótica e térmica, sendo que as

velocidades óticas apresentaram valores maiores em relação às térmicas para um mesmo experimento. Foi notada maior dificuldade de coleta dos dados nas imagens óticas, dada a imprecisão de sua borda principal, que vai se diluindo ao longo do escoamento, tornando mais difícil sua identificação.

As técnicas termográficas se mostraram viáveis e com resultados consistentes, apresentando desvios padrões pequenos para conjuntos de dados de uma mesma condição experimental. Ambas as técnicas (pela frente e pelo centroide) se mostraram consistentes, com as diferenças dos dados abrangidas pelas incertezas calculadas. Foi observado uma tendência de as velocidades do transporte de sedimentos se apresentarem inferiores às velocidades do escoamento para as mesmas condições experimentais. Isto era esperado já que a resistência ao movimento imposta pela massa dos sedimentos e o atrito com o fundo do canal atrasariam o movimento em relação ao fluxo ao seu redor.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto APQ-02045-17, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus Poços de Caldas

## Referências

Abrantes, J. R. C. B., Moruzzi, R. B., de Lima, J. L. M. P., Silveira, A., & Montenegro, A. A. A. (2019). Combining a thermal tracer with a transport model to estimate shallow flow velocities. *Physics and Chemistry of the Earth*, 109, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.12.005>

Abrantes, J. R. C. B., Moruzzi, R. B., Silveira, A., & de Lima, J. L. M. P. (2018). Comparison of thermal, salt and dye tracing to estimate shallow flow velocities: Novel triple-tracer approach. *Journal of Hydrology*, 557, 362–377. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.048>

AlZaatiti, F., Halwani, J., & Soliman, M. R. (2025). Climate change impacts on flood risks

- in the Abou Ali River Basin, Lebanon: A hydrological modeling approach. *Results in Engineering*, 25, 104186. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104186>
- Cojoc, L., de Castro-Català, N., de Guzmán, I., González, J., Arroita, M., Besolí-Mestres, N., Cadena, I., Freixa, A., Gutiérrez, O., Larrañaga, A., Muñoz, I., Elosegi, A., Petrovic, M., & Sabater, S. (2024). Pollutants in urban runoff: Scientific evidence on toxicity and impacts on freshwater ecosystems. *Chemosphere*, 369. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143806>
- De Lima, J. L. M. P., & Abrantes, J. R. C. B. (2014). Can infrared thermography be used to estimate soil surface microrelief and rill morphology? *Catena*, 113, 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.011>
- Felice, J. G. Transporte de material em suspensão e dissolvido em modelo físico com superfície impermeável utilizando chuva simulada. 2017. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.
- Ferdowsi, A., Piadeh, F., Behzadian, K., Mousavi, S.-F., & Ehteram, M. (2024). Urban water infrastructure: A critical review on climate change impacts and adaptation strategies. *Urban Climate*, 58, 102132. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102132>
- Guo, Y., Wang, C., Hong, S., Hong, W., Geng, R., Ren, Z., & He, X. (2025). Dynamic Evolution of PM2.5 Removal by Urban Forests During Rapid Urbanization: From Forest Landscape Pattern Dominance to Impervious Surfaces. *Journal of Cleaner Production*, 144930. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144930>
- Li, Y., Wang, P., Lou, Y., Chen, C., Shen, C., & Hu, T. (2024). Assessing urban drainage pressure and impacts of future climate change based on shared socioeconomic pathways. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101760>
- Liu, Z., He, Y., Luo, H., Liu, W., Liu, T., & Di, Y. (2025). Global assessment modeling to reveal spatiotemporal variations and socioenvironmental drivers in drainage system flood-resilient performance. *Reliability Engineering & System Safety*, 257, 110862. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110862>
- Lima, B. O. Transporte de material dissolvido pelo escoamento superficial produzido por um simulador de chuva sobre uma superfície impermeável. 2017. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.
- Montenegro, A. A. de A., Junior, V. de P. e. S., de Lima, J. L. M. P., da Silva, J. R. L., & Abrantes, J. R. C. de B. (2023). Estimation of topsoil moisture and hydraulic conductivity using infrared thermography in the Brazilian semiarid. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 28. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220205>
- Pessoti, B. P. L. Transporte de material em suspensão e dissolvido em superfície impermeável sob chuva artificial. 2018. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2018.
- Ren, S., Pan, Y., Zhu, X., Zhao, C., & Gao, Y. (2024). A general and simple automated impervious surface mapping approach based on three-dimensional texture features (3DTF) using fine spatial resolution remotely sensed imagery. *Science of the Total Environment*, 923. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171181>
- Xue, J., Zhang, W., Zhai, S., Liu, X., Lv, C., Dong, B., & Chen, L. (2025). Characteristics of runoff and sediment transport during flood events in the upper Yangtze River, China, in the last 50 years. *Catena*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108688>