

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

VALIDAÇÃO DE SIMULADOR DE CHUVA PELO MÉTODO DO COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE CHRISTIANSEN

Paulo Henrique Pereira dos Santos¹ ; José Rodrigues da Silva Neto² ; Frederico Carlos Martins de Menezes Filho³ & Rodrigo Cesar de Vasconcelos dos Santos⁴

Abstract: Rainfall simulators are essential equipment in hydrological studies, as they enable the controlled reproduction of variables such as precipitation intensity, droplet size and velocity, and the spatial distribution of water. This study aimed to validate a rainfall simulator equipped with a pressurized full-cone nozzle (FullJet ¼ SS HH 14W). Different operating pressures were tested to evaluate the uniformity of water distribution, assessed using the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC). The results indicated that the CUC decreased with increasing pressure—an unexpected behavior that may be related to sprinkler pressure and spray cone formation. Rainfall intensities ranged from 44.85 mm.h⁻¹ (heavy rain) to 98.84 mm.h⁻¹ (violent rain), according to the classification of World Meteorological Organization's classification (2024). The average performance of the simulator, with CUC values between 78,10% and 81,03% was considered satisfactory for artificial rainfall simulations. These findings contribute to improving the use of rainfall simulators in hydrological studies and emphasize the importance of careful calibration procedures.

Resumo: Simuladores de chuva são equipamentos essenciais para estudos hidrológicos, pois permitem a reprodução controlada de variáveis como a intensidade de precipitação, o tamanho e a velocidade das gotas, além da distribuição espacial da água. Deste modo, este trabalho objetivou a validação de um simulador de chuva com bico pressurizado de cone cheio, FullJet ¼ SS HH 14W. Foram testadas diferentes pressões para avaliar a uniformidade da distribuição de água, medida pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Os resultados mostraram que o CUC diminuiu com o aumento da pressão, comportamento inesperado que pode estar relacionado à pressão do aspersor e à formação do cone de pulverização. Além disso, as intensidades de precipitação variaram entre 44,85 mm.h⁻¹ (chuva pesada) a 98,84 mm.h⁻¹ (chuva violenta), de acordo com a classificação da *World Meteorological Organization* (2024). O desempenho médio do simulador, com CUC variando entre 78,10% a 81,03% foi considerado satisfatório para simulações de chuvas artificiais. Tais dados contribuem para a melhoria do uso de simuladores em estudos hidrológicos, demandando uma calibração criteriosa.

Palavras-Chave: Chuva artificial, chuva simulada, uniformidade.

1) Universidade Federal de Viçosa, *Campus* Rio Paranaíba - Rodovia BR 230 KM 7, 38810-000, Rio Paranaíba – MG, paulo.h.santos@ufv.br

2) Universidade Federal de Viçosa, *Campus* Rio Paranaíba - Rodovia BR 230 KM 7, 38810-000, Rio Paranaíba – MG, jose.r.neto@ufv.br

3) Universidade Federal de Viçosa, *Campus* Rio Paranaíba - Rodovia BR 230 KM 7, 38810-000, Rio Paranaíba – MG, frederico.menezes@ufv.br

4) Universidade Federal de Viçosa, *Campus* Rio Paranaíba - Rodovia BR 230 KM 7, 38810-000, Rio Paranaíba – MG, rodrigo.vasconcelos@ufv.br

INTRODUÇÃO

A imprevisibilidade e aleatoriedade das precipitações revelam-se como um obstáculo para a execução de experimentos voltados aos estudos de processos hidrológicos e erosivos em ambientes orgânicos e modificados pela ação humana. Para remediar esses limites, os simuladores de chuva veem tornando-se ferramentas imprescindíveis para obtenção de dados coesos e controlados, permitindo a réplica artificial de eventos pluviométricos bastante semelhantes aos naturais (Aksoy *et al.*, 2012; Confessor *et al.*, 2022).

Os simuladores de chuva têm como principal objetivo reproduzir, de modo padronizado e replicável, as variáveis mais importantes em uma chuva natural, tais como, diâmetro e velocidade das gotas, intensidade da precipitação, energia cinética e a uniformidade de distribuição espacial da lâmina d'água acima da superfície estudada (Gomes *et al.*, 2020). Essa capacidade de controle permite a realização de experimentos em condições específicas, isolando variáveis e possibilitando a reprodução de cenários climáticos de forma rápida e eficiente.

Além de oferecer um controle experimental mais preciso, esses dispositivos também ajudam na calibração de modelos matemáticos usados em hidrologia e processos erosivos. Eles geram dados com alta repetibilidade e confiabilidade (Pessoti, 2018). Um bom exemplo são os simuladores de bico pressurizado, que conseguem produzir gotas com velocidades e tamanhos semelhantes aos da chuva natural, apresentando coeficientes de uniformidade de Christiansen acima de 80%, como mostraram Sousa Júnior *et al.* (2017), Silveira *et al.* (2017) e Yönter e Houndonougbo (2022).

O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen em 1942, é amplamente utilizado para avaliar a homogeneidade da distribuição de água em sistemas de irrigação e simuladores de chuva. Trata-se de um indicador que permite quantificar o quão uniformemente a água é aplicada sobre uma determinada área, sendo valores superiores a 70% geralmente considerados satisfatórios. Em estudos que envolvem a simulação de chuvas, o CUC assume um papel essencial, pois assegura que a distribuição da água se aproxime das condições naturais de precipitação. Essa confiabilidade é crucial para que os experimentos produzam resultados representativos, permitindo análises mais precisas dos processos hidrológicos.

O uso de simuladores de chuva vai muito além dos laboratórios. Existem vários modelos projetados para serem usados em campo, com estruturas portáteis que se adaptam a diferentes inclinações, tipos de solo e coberturas vegetais. Essas características fazem dos simuladores grandes aliados em pesquisas sobre infiltração, escoamento superficial, transporte de sedimentos, avaliação de práticas conservacionistas e a dinâmica de poluentes, tanto dissolvidos quanto em suspensão (REIS, 2015; GOMES *et al.*, 2020).

Neste sentido, o presente artigo teve como objetivo validar um simulador de chuva com bico pressurizado de cone cheio, desenvolvido para a reprodução controlada de chuvas artificiais. Para isso, foram avaliadas diferentes pressões de trabalho, bem como a distribuição espacial da água por meio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), contribuindo para a confiabilidade dos resultados obtidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba, no Laboratório de Hidráulica. O simulador possui os seguintes componentes: 1 caixa d'água de 500 litros, 1 bomba hidráulica de 1 cv, 1 manômetro, 1 bico de diâmetro 1/4" do tipo Cheio (S.S. CO 1/4

HH – 14W), 1 mesa, isopor de 1 m², 25 copos de 200 ml, 8 metros de tubulação PVC e 1 manômetro de Bourdon. As Figuras 1 e 2 ilustram a disposição espacial do projeto.

Figura 1 – Conjunto Bico ¼ de polegada e manômetro de Bourdon.



Fonte: Autores (2024).

Figura 2 – Conjunto simulador de chuva.



Legenda: 1 – Conjunto Caixa d'água e bomba; 2 – Conjunto Bico ¼ polegada e Manômetro; 3- Plataforma com 25 copos.
Fonte: Autores (2025).

Foram avaliadas diferentes pressões de trabalho no sistema, a saber: 0,5 kgf.cm⁻², 1,0 kgf.cm⁻², 1,5 kgf.cm⁻² e 2,0 kgf.cm⁻². As simulações de chuva para cada pressão foram realizadas em triplicata, com a duração de 15 minutos. As condições experimentais foram mantidas livres de interferência

eólica, garantindo a estabilidade da trajetória das gotas. A Figura 3 demonstra o sistema em funcionamento.

Figura 3 – Aspersor em funcionamento.



Fonte: Autores (2024).

Para o teste de eficiência do bico utilizado, foi realizado o cálculo do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, que avalia a uniformidade da distribuição da chuva gerada pelo bico, descrito pela equação (1):

$$CUC = 100 * (1 - \sum_{i=1}^n \frac{|Xi - \bar{X}|}{n * \bar{X}}) \quad (1)$$

Sendo que, X_i é a lâmina precipitada no local; \bar{X} é a lâmina média precipitada; n é o número de observações.

Para o número de observações, foram dispostos 25 copos de 200 ml, espaçados entre si 20 cm, distantes em 10 cm da borda, numa área de 1 m². A distância entre o bico e as superfícies de captação dos copos foi de 1,10 m.

Após a execução dos ensaios em triplicata, com os respectivos CUC's obtidos, calculou-se a média do referido coeficiente para cada pressão estabelecida. Então, utilizou-se o *software Surfer*, que permitiu a geração de mapas de distribuição espacial da precipitação simulada por meio de interpolação e construção de isolinhas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) encontrados para todas as simulações podem ser visualizados na Tabela 1. De acordo com Christiansen (1942), tais resultados obtidos são satisfatórios para reprodução de chuvas artificiais, visto que, os CUC's foram superiores a 70%.

Do mesmo modo, Askoy *et al.* (2012) e Salah *et al.* (2022) afirmaram que simuladores com CUC's iguais ou maiores que 80% são adequados para reproduzir precipitações artificiais. Os valores de CUC obtidos neste estudo foram próximos a 80% em todas as pressões testadas, atendendo aos

critérios estabelecidos por Askoy *et al.* (2012) e Salah *et al.* (2022). Isso indica que o simulador utilizado apresentou desempenho satisfatório.

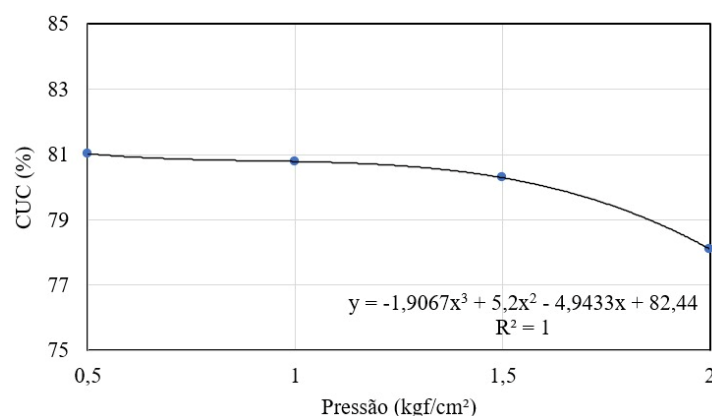
Tabela 1 – Valores do CUC para cada experimento

Intervalo de Tempo (min)	Pressão (kgf.cm ⁻²)	Intensidade da precipitação (mm.h ⁻¹)	CUC (%)
15	0,5	44,85	81,03
	1,0	65,29	80,79
	1,5	82,50	80,29
	2,0	98,84	78,10

Fonte: Autores (2025).

Na figura 4, verifica-se a relação entre o CUC e a pressão exercida no simulador.

Figura 4 – Relação CUC versus Pressão.



Fonte: Autores (2025).

Com os resultados obtidos, verificou-se uma relação inversamente proporcional entre o CUC e a pressão, diferentemente dos valores encontrados no trabalho de Sousa Júnior *et al.* (2017). No referido trabalho, as pressões de 50 KPa (0,51 kgf.cm⁻²), 80 KPa (0,82 kgf.cm⁻²), 110 KPa (1,12 kgf.cm⁻²), 140 KPa (1,43 kgf.cm⁻²) e 170 KPa (1,73 kgf.cm⁻²) para 2 bicos FullJet ½ SS HH 40, resultaram para a área de 1 m² em valores médios de CUC iguais a 68%, 82%, 84,5%, 85%, 84,9%, respectivamente.

Diante dessas informações, pode-se afirmar que o comportamento do CUC ao longo da variação da pressão ocorreu de modo esperado, principalmente pelo fato de ter um acréscimo inicial da uniformidade, uma estabilização e uma queda. Esse comportamento do CUC descrito acima é mais perceptivo para o bico ½ HH-40 SS conforme a Tabela 2, que simplifica os resultados de Yönter e Houndonougbo (2022). Importante salientar que os valores em KPa das pressões utilizadas são próximas de 50, 100, 150 e 200 KPa (0,51, 1,02, 1,53 e 2,04 kgf.cm⁻²). Por isso, o trabalho de Sousa Júnior *et al.* (2017) foi mais representativo, apesar de ambos os trabalhos comprovarem esse comportamento não linear, principalmente quando ambos os trabalhos utilizam o mesmo bico.

Tabela 2 – Dados de Intensidade e CUC em função da Pressão e do Bico FullJet.

	½ HH-36 SQ		½ HH-40 SS		½ HH-50 WSQ	
Pressão (KPa)	I (mm.h ⁻¹)	CUC (%)	I (mm.h ⁻¹)	CUC (%)	I (mm.h ⁻¹)	CUC (%)
30	204	79	196	83	85	85
40	206	85	204	83	93	83
50	209	86	209	85	97	86
60	209	87	215	86	101	86
70	211	87	224	85	109	87

Fonte: Yönter e Houndonougbo (2022).

Para a intensidade da chuva com as pressões utilizadas neste trabalho não foi possível a comparação com os trabalhos supracitados. Yönter e Houndonougbo (2022), para uma pressão de 50 KPa (0,51 kgf.cm⁻²) obtiveram uma intensidade de 97 mm.h⁻¹ para o bico que gera menor intensidade.

Já Sousa Júnior *et al.* (2017), para a mesma pressão, a intensidade de precipitação fora de 172 mm.h⁻¹. No presente trabalho para essa mesma pressão obteve-se uma intensidade de 44,85 mm.h⁻¹, o que revela a importância da escolha do bico para a construção do simulador. Por mais que não seja válido a comparação quantitativa, em ambos os estudos, quanto maior a pressão, maior a intensidade, como pôde ser constatado pela Tabela 1.

Silveira *et al.* (2017), considerando uma área de 100 m² com 3 bicos FullJet ¼ HH-W a uma pressão de 166,76 KPa (1,70 kgf.cm⁻²), obtiveram uma intensidade variando entre 75,12 a 76,83 mm.h⁻¹, além de um CUC de 83,05%. Apesar das condições de contorno serem diferentes, para uma pressão próxima de 150 KPa (1,5 kgf.cm⁻²), no presente simulador, obteve-se uma intensidade de 82,50 mm/h e um CUC de 80,29%. Diante disso, devido ambos os trabalhos possuírem o mesmo bico e pressões próximas, pode-se confirmar a validade dos resultados da intensidade.

Outro ponto importante a se destacar, é a classificação da precipitação em função da intensidade, que se apresenta na Tabela 3. Conforme a *World Meteorological Organization* (2024) os resultados das intensidades possuem característica física de uma chuva pesada para a primeira pressão, já para as demais, as chuvas simuladas são classificadas como precipitações violentas.

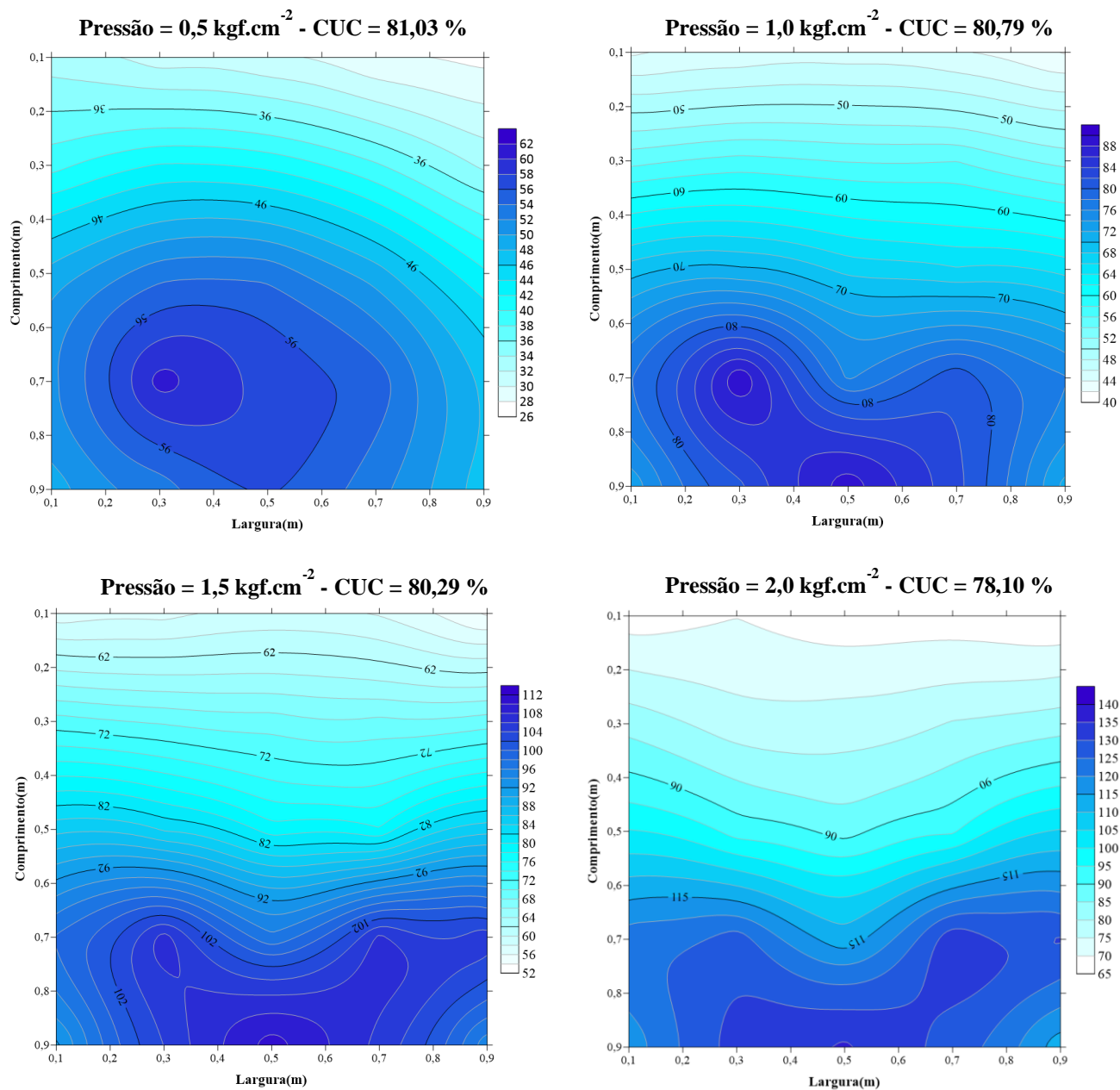
Tabela 3 – Tipos de Precipitação.

Tipo de Precipitação	Intensidade (mm.h ⁻¹)
Leve	< 2,5
Moderada	2,5 ≤ i < 10
Pesada	10 ≤ i < 50
Violenta	≥ 50

Fonte: World Meteorological Organization (2024).

Por fim a Figura 5, apresenta as distribuições espaciais da precipitação com os volumes coletados pelos copos, variando entre 26 mm.h⁻¹ para a pressão de 0,5 kgf.cm⁻² e 140 mm.h⁻¹ para uma pressão de 2,0 kgf.cm⁻².

Figura 5 – Distribuição espacial da precipitação simulada para todos os experimentos.



Fonte: Autores (2025).

CONCLUSÃO

O simulador de chuvas utilizado neste estudo apresentou resultados satisfatórios para a reprodução de chuvas artificiais, com coeficientes de uniformidade que variaram entre 78,10 % a 81,03 %, para pressões no intervalo de 0,5 a 2 kgf.cm⁻², respectivamente.

Os resultados indicam que a pressão de operação influencia significativamente no CUC. Apesar do comportamento não linear do CUC em relação à pressão, o equipamento demonstrou ser uma ferramenta eficaz para estudos hidrológicos que demandam controle das condições de precipitação.

As intensidades de precipitação simuladas variaram entre 44,85 mm.h⁻¹, classificadas como chuvas pesadas, a 98,84 mm.h⁻¹, caracterizadas como chuvas violentas, conforme World Meteorological Organization (2024).

REFERÊNCIAS

- AKSOY, H.; UNAL, N. E.; COKGOR, S.; GEDIKLI, A.; YOON, J.; KOCA, K.; INCI, S. B.; ERIS, E. (2012). *“A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume”*. Catena, v. 98, p. 63–72.
- CONFESSOR, J. G.; CARVALHO, F.; RODRIGUES, S. C. (2022). *“Desenvolvimento, calibração e validação de um simulador de chuvas aplicado a estudos hidrogeomorfológicos.”* Geografia (Londrina), v. 31, n. 2, p. 233–248.
- GOMES, C.; SANTOS, M. A. L. S.; LIMA, S. F.; SANTOS, I. G. O.; CARVALHO, T. N. A.; SANTOS, V. R.; ALVES, E. S. (2020). *“Calibração de um sistema de chuva simulada por diâmetro da gota pelo método da farinha e coeficiente de uniformidade”*. Revista Ciência Agrícola, Rio Largo, v. 18, n. 3, p. 43-47.
- PESSOTI, B. P. L. (2018) *“Aplicação do delineamento experimental das faces centradas para simular o transporte de material em suspensão e dissolvido em superfície impermeável sob chuva artificial.”* 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas.
- REIS, S. S. (2015). *“Influência da densidade e da altura de edificações na transformação de precipitação-escoamento utilizando chuva simulada em modelo reduzido de bacia hidrográfica urbana com diferentes declividades.”*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2015.
- SALAH, I. C.; FARO, V. P.; OLIVEIRA, E. P. (2022). *“Simulador de chuva para análise de infiltração de água no solo”* in Anais do XX COBRAMSEG; Campinas.SP.BR. Campinas : Galoá; 2022.
- SILVEIRA, A.; ISIDORO, J.M.G.P.; DEUS, F.P.; REIS, S.S.; SILVA, A.M.D.; GONÇALVES, F.A.; MENEZES, P.H.B.J.; TIEZZI, R.D.O. (2017), *“Enhancing the spatial rainfall uniformity of pressurized nozzle simulators”*. Management of Environmental Quality, Vol. 28 No. 1, pp. 17-31.
- SOUSA JÚNIOR, S. F.; MENDES, T. T.; SIQUEIRA, E. Q. (2017). *“Development and calibration of a rainfall simulator for hydrological studies”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH, Porto Alegre, v. 22, e59.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. (2024) *“Manual on the WMO Integrated Global Observing System (WIGOS)”*. Geneva: WMO. v. I. (WMO-No. 8), p. 511.
- YÖNTER, G.; HOUNDONUGBO. M. H. (2022). *“Comparison of different fulljet nozzles used in laboratory type rain simulator in terms of some rainfall characteristics”*. Ege Univ. Ziraat Fak. Derg., 59 (1): 33-41.

AGRADECIMENTOS - À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio à pesquisa.