

Análise de chuvas intensas para o município de Juiz de Fora (MG)

Intense rain analysis for the municipality of Juiz de Fora (MG)

Juliana Albuquerque Pereira¹; Aline de Araújo Nunes²; Bárbara Cristina Mendanha Reis³; Anália Maria Gomes Pereira⁴; Gabriel de Almeida Costa⁵

- ¹ Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas/Departamento de Engenharia Urbana, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: juliana.pereira@agnet.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2250-8151>
- ² Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas/Departamento de Engenharia Urbana, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: aline.nunes@ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1050-5304>
- ³ Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas/Departamento de Engenharia Urbana, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: barbara.reis@ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3266-0113>
- ⁴ Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas/Departamento de Engenharia Urbana, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: analia.pereira@aluno.ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6274-9662>
- ⁵ Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas/Departamento de Engenharia Urbana, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: gabriel.almeida2@aluno.ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3670-5852>

Resumo: O propósito deste estudo foi realizar uma análise de séries temporais de chuva para o município de Juiz de Fora (MG), por meio de testes estatísticos, e revisar a Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) válida para o local. Com a coleta de dados subdiários da estação 83692 do INMET e a avaliação de tendências pelo teste de Mann-Kendall, confirmou-se a tendência crescente das intensidades de chuva para o município, considerando algumas durações críticas analisadas. Procedeu-se ao ajuste de uma nova equação IDF, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, sendo a distribuição GEV a que melhor se ajustou. Os resultados mostraram que, para durações superiores a 60 minutos, a equação IDF ajustada obteve valores superiores em 50% das durações avaliadas, o que infere na utilização dessa equação para durações acima de 60 minutos de modo a auxiliar na contenção de prejuízos causados por índices pluviométricos que ocorram por horas. Enquanto que para as durações inferiores a 60 minutos, sugere-se a utilização da equação de Freitas *et al* (2001).

Palavras-chave: Equações de Intensidade-Duração-Frequência; Hidrologia urbana; Mudanças climáticas.

Abstract: The purpose of this study was to analyze rainfall time series for the municipality of Juiz de Fora (MG) using statistical tests and to review the Intensity-Duration-Frequency (IDF) Equation valid for the location. With the collection of sub-daily data from INMET station 83692 and the accessing trends using the Mann-Kendall test, the increasing trend in rainfall intensities for the municipality was confirmed, considering some critical durations analyzed. A new IDF equation was then adjusted using the Kolmogorov-Smirnov test, with the GEV distribution being the best fit. The results showed that, for durations longer than 60 minutes, the adjusted IDF equation yielded higher values in 50% of the evaluated durations, suggesting its application for durations over 60 minutes to help mitigate damages caused by prolonged rainfall indices. Meanwhile, for durations shorter than 60 minutes, the use of the equation proposed by Freitas *et al.* (2001) is recommended.

Keywords: Intensity-Duration-Frequency Equations; Urban Hydrology; Climate Change.

1. Introdução

O processo de urbanização é um fenômeno complexo e multifacetado, que provoca alterações no ciclo hidrológico e contribui para o aumento de eventos extremos, o que tem sido uma preocupação crescente nas últimas décadas (FERREIRA, 2022). Tal situação leva os gestores e pesquisadores ao desenvolvimento de soluções que suportem a demanda local, com o objetivo de direcionar as águas pluviais de modo que não afetem negativamente a área urbana, garantindo a eficácia dos sistemas e considerando fatores como a capacidade de dimensionamento, execução, manutenção adequada e o uso de tecnologias avançadas.

Considerando a importância de um dimensionamento adequado para os sistema de drenagem, a equação Intensidade, Duração e Frequência (IDF) é uma ferramenta matemática que relaciona a intensidade da precipitação com a duração e a frequência do evento (CARDOSO, 2021). Pelo fato da equação ter a capacidade de prever a intensidade do evento de precipitação com uma certa probabilidade de ocorrer em um determinado tempo de duração, é possível obter um sistema de drenagem dimensionado adequadamente para acomodar a quantidade de água esperada.

Como estudo de caso desta pesquisa tem-se o município de Juiz de Fora (MG), que sofre com inundações frequentes provenientes da expansão da malha urbana, do setor industrial, associado às intervenções do Rio Paraibuna. Ainda que exista o monitoramento dos índices pluviométricos do município, ele sofre com inundações frequentes (KNOPP, 2016), deixando clara a ineficácia dos sistemas de drenagem perante à intensidade das chuvas que a cidade enfrenta. Neste sentido, o estudo constante do comportamento das séries temporais de chuva é considerado de extrema relevância, uma vez que as ferramentas necessárias para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas devem estar coerentes com a realidade (GUIMARÃES et al, 2020).

Nos últimos anos, o município tem enfrentado uma série de inundações que causaram danos materiais e prejuízos para a população. A frequência das inundações em Juiz de Fora, como em muitos outros municípios brasileiros, tem sido associada a diversos fatores, como o crescimento urbano desordenado, a falta de investimentos em infraestrutura de drenagem (FRAGOSO et al, 2016) e as alterações climáticas, que, possivelmente, têm provocado chuvas mais intensas e frequentes em algumas regiões do país. Em vista disso, para lidar com o problema das inundações, a cidade tem buscado investir em infraestrutura de drenagem e em projetos de planejamento urbano que levem em conta a prevenção de desastres naturais. No entanto, ainda há muito a ser feito para minimizar os impactos das inundações em Juiz de Fora e garantir a segurança e o bem-estar da população.

Nesse sentido, é necessário ressaltar a urgência da obtenção e atualização de dados utilizados no dimensionamento de estruturas de drenagem (CANHOLI, 2015). Sendo assim, se destaca a importância do estudo de séries de dados pluviométricos, uma vez que, para o desenvolvimento de ferramentas de dimensionamento ajustadas à realidade, é necessário a investigação de possíveis tendências nas séries históricas visando a prevenção dos impactos provocados pelas cheias. A equação IDF de Juiz de Fora foi determinada por meio de estudos de Freitas et al. (2001), na Universidade Federal de Viçosa, considerando os dados de uma estação pluviométrica local. Sendo assim, o presente estudo visa analisar as séries temporais de chuva para o município, por meio de testes estatísticos, e revisar a Equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) válida para o local.

2. Metodologia

2.1 Caracterização da área de estudo

Juiz de Fora é um município localizado na Zona da Mata de Minas Gerais, na região Sudeste do Brasil, com aproximadamente 540.756 habitantes e área igual a 1.435,749 km² (IBGE CIDADES, 2022). Sua organização espacial deu-se às margens do rio Paraibuna, a partir de povoados agrícolas e industriais próximos ao longo do traçado da estrada do Caminho Novo, embora tenham ocorrido mudanças com o movimento de expansão do município. O Rio Paraibuna é um dos principais tributários do Rio Paraíba do Sul, pertencente à região hidrográfica do Atlântico Sudeste (LORENZOTTI, 2020).

Nota-se que o processo de urbanização do município de Juiz de Fora está relacionado com o seu principal corpo hídrico, o Rio Paraibuna. Nesse sentido, destaca-se um fato histórico relevante ocorrido em 1889, o aproveitamento da queda d'água da cachoeira de MarmelEos, pertencente ao rio Paraibuna, para a construção da primeira usina hidrelétrica da América do Sul (IBGE CIDADES, 2021).

O clima de Juiz de Fora apresenta duas estações bem definidas: (i) ocorre de outubro a abril, com temperaturas mais elevadas e maiores índices pluviométricos; e (ii) entre maio e setembro, com menores temperaturas e menor presença de

chuvas (TORRES, 2006). O mesmo autor afirma que o clima pode ser considerado como mesotérmico em conformidade com a classificação de W. Köppen.

Segundo os dados do clima de Juiz de Fora (1991 à 2020), obtido por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o verão apresenta os maiores índices pluviométricos, com a maior a média em dezembro (310,4 mm) e a menor média em fevereiro (207,5mm), considerando que menor média dos anos foi em julho (14,4mm).

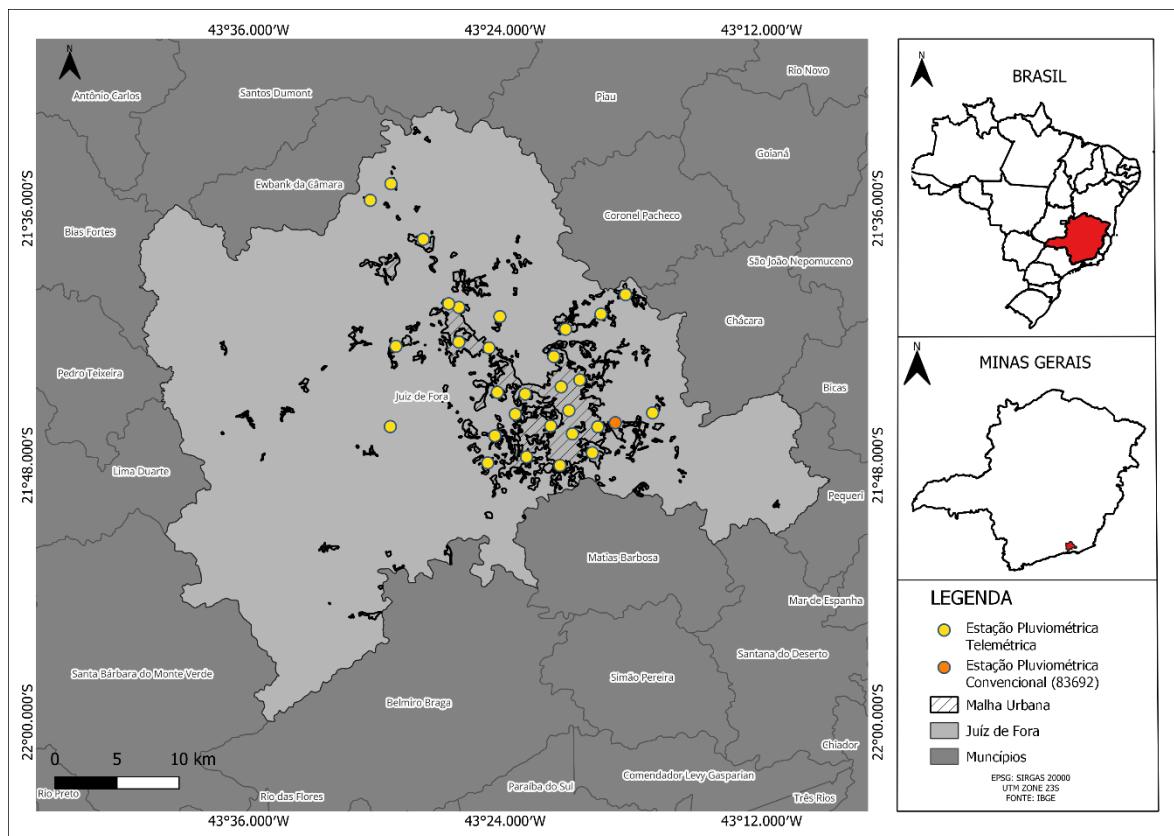
Torres (2006) ainda informa que, em relação à distribuição dos deslocamentos de massa de ar, é notória a presença de ventos provenientes do quadrante norte. Tal fator, associado ao fundo de vale do rio Paraibuna, forma uma espécie de direcionamento destas massas de ar até o centro urbano.

A bacia hidrográfica do Rio Paraibuna possui 70% do seu curso localizado em Juiz de Fora, sendo a origem do rio no município de Antônio Carlos. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), esta sub-bacia abrange uma área de drenagem que totaliza 8.558 km², representando aproximadamente 15,4% da área total de drenagem da bacia do Rio Paraíba do Sul (ANA, s.d).

Problemas vinculados às enchentes estão cada vez mais recorrentes, sobretudo no meio urbano (CASTELHANO, 2020). Registros de cheia, como os ocorridos nos anos 1919 (CIRIGLIANO, 1940), 1940 (MACHADO; CUNHA, 2011), 2023 (JUIZ DE FORA, 2024), 2024 (JUIZ DE FORA, 2024) trouxeram prejuízos materiais e imateriais para a população Juiz Forana.

2.2 Obtenção e análise preliminar dos dados pluviométricos subdiários do município de Juiz de Fora (MG)

Os dados de chuva utilizados no presente trabalho foram obtidos, primordialmente, a partir da estação convencional de medição 83692 (JUIZ DE FORA) do INMET, com dados pluviográficos. Em consequência da não disponibilidade de outras estações convencionais com um volume de dados subdiários superior a 15 anos, foi avaliado o uso de estações telemétricas do CEMADEN, que também possuem dados subdiários. As estações avaliadas nesta pesquisa estão apresentadas na Figura 1, com destaque à localização do município no estado de Minas Gerais.



*Figura 1 – Localização das estações pluviométricas.
Fonte: Autores (2025).*

A análise dos dados pluviométricos teve início na investigação dos registros em papel (pluviógrafo) da estação meteorológica de código 83962. No dia 5 de Junho de 2023, foi realizada a coleta de dados por meio de registro fotográfico dos pluviogramas em papel, junto ao Instituto Nacional de Meteorologia.

A análise supracitada englobou os registros pluviométricos a partir do ano hidrológico 1998/1999. A determinação do ano inicial de análise se deu em função da equação IDF em vigência, proposta por Freitas et al. (2001), que incorpora os dados pluviométricos até 1999, tornando essencial a investigação das informações posteriores a essa data. Vale ressaltar que o objetivo inicial era incorporar à análise os dados utilizados por Freitas et al. (2001), porém após contatar a equipe responsável pelo estudo verificou-se a impossibilidade de acesso aos dados.

Neste contexto, ainda que tenha sido possível obter os dados da maioria dos anos hidrológicos a partir de 1998/1999, surgiram lacunas de informação nos seguintes anos: 2010/2011; 2011/2012; 2013/2014; 2014/2015; 2015/2016; 2016/2017; 2019/2020. Dessa forma os anos citados foram descartados da análise por não apresentarem registros pluviométricos para meses chuvosos. Além disso, nos registros disponíveis no INMET, foram identificadas anotações que indicavam problemas no equipamento.

A fim de preencher algumas das lacunas supracitadas, foram analisados os dados das estações telemétricas do CEMADEN. No entanto, tal procedimento revelou-se inviável, uma vez que essas estações também exibiam muitas lacunas na série histórica e/ou apresentavam discrepâncias nos registros pluviométricos em relação à estação principal do INMET, tanto em termos quantitativos, quanto em relação aos períodos de registro. Assim, decidiu-se não utilizar as estações do CEMADEN.

Considerando os dados subdiários da estação 83962, foram selecionadas, para todos os anos hidrológicos consistentes, as máximas alturas de chuva que correspondem às seguintes durações: 15 min, 30 min, 45 min, 1h, 2h, 3h, 4h, 8h, 12h e 24h. Em seguida, o processo executado foi o cálculo da intensidade correspondente a cada uma dessas durações.

2.3 Análise de estacionariedade dos dados pluviométricos subdiários do município de Juiz de Fora (MG)

Devido à importância de se avaliar a estacionariedade dos dados para a proposição de uma nova IDF, foi utilizado o teste de tendência não paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945 apud NUNES, 2018; KENDALL, 1975 apud NUNES, 2018), para amostras independentes. Para aplicar esse teste de tendência, foram utilizados os dados de intensidades de chuva por ano hidrológico das estações 83692 (Juiz de Fora) do INMET e o software Minitab®. O teste de Mann-Kendall é uma técnica estatística não paramétrica usada para avaliar a presença de tendências em séries temporais (OLIVEIRA, 2017). Tal teste tem como base a comparação dos valores observados de uma série temporal com suas medianas, avaliando se há uma tendência crescente, decrescente ou nenhuma tendência significativa ao longo do tempo (JUNIOR; LUCENA, 2020). Assim, ele permite determinar se há uma tendência significativa na precipitação ao longo do tempo. A hipótese nula assume a ausência de tendência, enquanto a hipótese alternativa sugere uma tendência.

As hipóteses avaliadas foram:

- Hipótese nula (H_0): não existe tendência significativa dos dados da série temporal.
- Hipótese alternativa (H_1): existe tendência significativa dos dados da série temporal.

Adotando o nível de significância de 5% seria possível afirmar que há tendência monotônica da série temporal, caso o p valor seja superior a esse valor.

2.4 Atualização da equação IDF para o município de Juiz de Fora (MG)

Para a concepção da nova curva IDF, foi realizado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov no software ALEA, considerando o Método de Momentos-L para estimativa dos parâmetros das distribuições. Nessa etapa, busca-se verificar qual(is) distribuição(ões) de probabilidade ((i) Exponencial, (ii) Gama, (iii) Generalizada de Valores Extremos (GEV), (iv) Gumbel, (v) Lognormal do tipo II, (vi) Lognormal do tipo III e (vii) Pearson do tipo III) se ajustam aos dados das máximas intensidades de chuva por ano hidrológico, para cada duração analisada. Em seguida, busca-se classificar as distribuições em função do grau de aderência.

Considerando que a distribuição GEV foi a que melhor se ajustou aos dados, para realizar o cálculo dos quantis, utilizou-se a Equação 1:

$$x(TR) = \beta + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right] \right\}^k \quad (1)$$

Sendo:

$x(TR)$ = quantil da intensidade para determinado tempo de retorno TR;

κ, α, β = parâmetros de forma, escala e posição respectivamente;

TR = tempo de retorno, em anos.

Em concordância com Nascimento et al. (2017) e por meio do método proposto por Naghettini e Pinto (2007), estima-se os parâmetros a, b, c, d da equação generalizada. Assim, partindo da Equação 1, faz-se a simplificação:

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} \rightarrow i = \frac{A}{(t + c)} d \quad (2)$$

Considerando a aplicação de logaritmo em ambos os lados da Equação 2, obtém-se:

$$i = \frac{A}{(t + c)^d} \rightarrow \log i = \log A - d \cdot \log(t + c) \quad (3)$$

As variáveis "d" e "log A" podem ser obtidas considerando a Equação 3 como linear. Sendo assim, há a necessidade de plotar gráficos de dispersão dos logaritmos das intensidades (i) e os logaritmos das durações (t), e, por conseguinte, somados ao parâmetro "c", o qual será estimado por meio do valor do coeficiente de determinação (r^2) que mais se aproximar de 1, por tentativa e erro (NASCIMENTO et al, 2017; CARDOSO, 2021). Adicionalmente, os parâmetros "a" e "b" foram obtidos por meio da Equação 4, que é uma simplificação da Equação 2.

$$A = aT^b \quad (4)$$

Em seguida, é aplicado o logaritmo em ambos os lados da Equação 4, obtendo-se:

$$\log A = \log a + b \log T \quad (5)$$

Ainda na determinação dos parâmetros a e b, faz-se um gráfico de dispersão ajustado a partir da Equação 5, todavia, plotando as variáveis $\log A$ e $\log T$, nos eixos y e x, respectivamente (NASCIMENTO et al., 2017). Assim, é possível ajustar os parâmetros da nova equação IDF, e desse modo, foram realizadas as estimativas das intensidades pluviométricas, a fim de compará-las aos resultados obtidos pela equação vigente implementada por Freitas et al. (2001).

Considerando, por fim, a interrelação entre drenagem urbana, precipitação e o dimensionamento de estruturas hidráulicas, a equação IDF desempenha um papel crucial no Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU). Nesse contexto, o presente estudo também se propõe a examinar as implicações, em termos de diretrizes técnicas de dimensionamento, resultantes dessa relação e como a comprovação de tendências significativas no padrão de precipitação afetam o município.

3. Resultados e discussão

3.1 Obtenção e análise preliminar dos dados pluviométricos subdiários do município de Juiz de Fora (MG)

Conforme a metodologia apresentada, decidiu-se não utilizar as estações do CEMADEN, sendo, então, apresentadas na Tabela 1 as intensidades provenientes da análise da estação 83692.

A falta de informações disponíveis de qualidade e de fácil acesso no presente estudo representou um desafio significativo. De acordo com Zarekarizi et al. (2018), o monitoramento da precipitação e a organização de um banco de dados históricos ajudam a compreender a complexidade desses fenômenos, tanto para verificação de médias históricas quanto para espacialização e modelagem de eventos futuros.

Tabela 1 – Intensidades máximas por ano hidrológico, em mm/h, obtidas por meio da estação 83692.

Anos	Duração (horas)									
	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	8	12	24
1998/1999	60,00	40,00	40,00	20,10	6,80	12,25	7,38	5,83	5,83	22,50
1999/2000	68,00	44,00	30,67	24,00	19,10	7,03	10,50	7,65	5,67	17,00
2000/2001	116,00	60,00	44,00	50,00	42,50	7,00	22,75	13,63	10,13	32,10
2001/2002	80,00	60,00	40,80	31,00	16,30	10,87	8,15	-	-	-
2002/2003	65,60	52,80	44,53	36,00	19,65	13,20	9,90	-	-	-
2003/2004	58,40	40,20	37,33	32,00	20,00	15,60	12,00	6,01	4,67	-
2004/2005	64,00	40,00	40,00	36,60	19,00	13,00	10,05	6,25	5,00	21,00
2005/2006	64,00	40,80	32,80	37,20	20,70	14,27	10,78	5,88	4,17	14,00
2006/2007	68,00	42,20	34,67	40,00	21,00	14,93	11,30	6,90	-	-
2008/2009	44,00	42,00	40,27	50,00	30,00	20,40	15,53	8,20	5,55	-
2012/2013	72,00	40,40	40,00	34,90	17,50	11,67	-	-	-	11,90
2017/2018	56,00	40,00	44,67	50,00	40,00	28,00	24,15	13,25	-	-
2018/2019	80,00	60,00	74,93	60,00	30,20	20,40	15,65	8,00	5,42	18,75
2020/2021	66,00	60,00	46,13	50,00	37,90	28,10	-	-	-	-

Fonte: Autores (2023).

3.2 Análise de estacionariedade dos dados pluviométricos subdiários do município de Juiz de Fora (MG)

Considerando as limitações apresentadas no tópico anterior, os anos de dados disponíveis foram utilizados, mesmo que de forma descontínua, na tentativa de compreender a realidade do município.

O teste de Mann-Kendall foi aplicado para verificar a existência ou não de tendência nos dados. A hipótese nula desse teste considera que os dados são estacionários, enquanto a hipótese alternativa testa a existência de tendência crescente ou decrescente. O resumo dos resultados encontra-se na Tabela 2, incluindo os valores de p-valor e por conseguinte, a avaliação da tendência, considerando “-” a inexistência de tendência e “T+” como tendência de crescimento significativa ao nível de 95% de confiança. Cabe destacar que a análise de tendência para 12 e 24 horas não foi realizada devido ao tamanho amostral dos dados para tais durações.

Tabela 2 – Resultado do teste de tendência de Mann-Kendall realizado no Minitab® para dados da estação 83692 do INMET, em Juiz de Fora.

Duração (minutos)	z	p-valor Tendência crescente	p-valor Tendência decrescente	Resultado
15	-0,274963	0,608	0,392	-
30	0,0557856	0,478	0,522	-
45	1,59640	0,055	0,945	-
60	3,10632	0,001	0,999	T+
120	3,10632	0,011	0,989	T+
180	3,12515	0,001	0,999	T+
240	2,40004	0,008	0,992	T+
480	1,25220	0,105	0,895	-

Fonte: Autores (2023).

Ao nível de 95% de confiança, rejeita-se a hipótese nula em favor da alternativa, e afirma-se que existe tendência de crescimento para as durações de chuva de 60, 120, 180 e 240 minutos registradas na estação 83692 do INMET, em Juiz de Fora, entre os anos de 1998 a 2021.

Esses resultados apontam a necessidade de avaliação da equação IDF em vigor em Juiz de Fora, uma vez que a não estacionariedade dos dados se comprovou para algumas durações. Esse resultado pode ser indicativo de que na região do município em estudo, fatores como as mudanças climáticas e as expansões urbanas no ambiente podem estar afetando os índices pluviométricos. Segundo Nunes (2018), o processo de urbanização e as mudanças climáticas são grandes indutores de ocorrências de tempestades. A autora também afirma que as ferramentas que indicam e mensuram tendências, como realizado neste estudo, fortalecem a resiliência das cidades. Assim, em conformidade com os desfechos da análise de Mann-Kendall e com os dados municipais apresentados no referencial teórico, é plausível deduzir que tanto a marcante urbanização quanto os impactos das mudanças climáticas de alcance global podem estar exercendo influência nas modificações das intensidades pluviométricas no município de Juiz de Fora.

Quanto ao efeito da notável tendência de crescimento das chuvas com durações acima de 60 minutos, é fundamental ressaltar a relevância das chuvas prolongadas na indução de processos erosivos no solo. Chuvas de longa duração têm um impacto significativo na erosão das encostas devido à saturação do solo. À medida que a água penetra profundamente no solo, ela preenche os espaços entre as partículas, aumentando a pressão nos poros. O aumento da poro-pressão reduz a resistência do solo e sua capacidade de retenção. De acordo com Aguiar (2009), a combinação da poro-pressão com a água que escoa superficialmente cria um ambiente propício para o despreendimento das partículas do solo. O autor afirma que com a saturação deste, a água em excesso não consegue ser absorvida, o que resulta em um maior escoamento superficial, carregando as partículas desagregadas pela encosta abaixo. Esse processo de erosão é intensificado em chuvas de longa duração, aumentando os riscos de deslizamentos e danos à população e à paisagem.

3.3 Atualização da equação IDF para o município de Juiz de Fora (MG)

Na Tabela 3 foram sumarizadas as distribuições de probabilidade ajustadas para as diferentes durações registradas na estação 83692 do INMET para o período de estudo deste trabalho. Um esquema de classificação foi desenvolvido para julgar a qualidade geral do ajuste de cada distribuição, comparando a estatística de teste e o p-valor do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Uma distribuição com a estatística de teste mais baixa ou o p-valor mais alto receberia uma classificação de melhor ajuste dos dados, ou seja, melhor ordem no posicionamento.

Uma análise dos resultados do teste de qualidade do ajuste revela que, em muitos casos, houve pouca diferença entre as várias distribuições para as diferentes durações avaliadas. As distribuições de probabilidade de melhor ajuste foram GEV e Gumbel teórica, respectivamente. A distribuição GEV forneceu o melhor ajuste para as durações de 1, 3, 8 e 12 horas. A distribuição Gumbel forneceu o melhor ajuste para as durações de 15 minutos, 45 minutos e 4 horas. As distribuições exponencial e LogNormal de 2 parâmetros foram, de forma geral, mal classificadas em comparação às outras distribuições.

Vale ressaltar que o fato de uma distribuição ter uma classificação baixa não significa, necessariamente, que ela teve um desempenho ruim, uma vez que as diferenças de ajuste entre diferentes distribuições podem ou não ser estatisticamente significativas, como por exemplo a exponencial, que para a duração de 30 minutos teve o melhor ajuste diante das demais. Assim como mencionado acima, referente às características dos testes estatísticos e p-valor do teste Kolmogorov-Smirnov, a maioria das distribuições de probabilidade ajustadas resultantes foram consideradas apropriadas para todas as durações, com exceção da distribuição Pearson 3 parâmetros nas situações sinalizadas como não ajustadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	DURAÇÃO														
	15 minutos			30 minutos			45 minutos			1 hora			2 horas		
	p-valor	Estatística de teste	ranking	p-valor	Estatística de teste	Ranking	p-valor	Estatística de teste	Ranking	p-valor	Estatística de teste	Ranking	p-valor	Estatística de teste	Ranking
EXPONENCIAL	0,424	0,2256	6	0,5187	0,2097	1	0,2869	0,253	6	0,6144	0,1947	7	0,5754	0,2007	2
GAMA	0,5485	0,2049	5	0,1712	0,2849	7	0,4972	0,2131	2	0,6767	0,1852	4	0,4655	0,2184	7
GEV	0,6795	0,1848	2	0,337	0,2422	4	0,3465	0,2403	3	0,7693	0,1708	1	0,5403	0,2062	5
GUMBEL	0,8145	0,1633	1	0,2434	0,2636	5	0,5613	0,2029	1	0,6444	0,1901	6	0,5117	0,2108	6
LOGNORMAL 2P	0,6398	0,1908	4	0,1885	0,2792	6	0,4318	0,2242	4	0,6685	0,1864	5	0,6048	0,1962	1
LOGNORMAL 3P	0,6484	0,1895	3	0,3967	0,2306	3	0,3212	0,2455	5	0,7294	0,1771	3	0,5495	0,2048	4
PEARSON 3P	0	1,0714	Não se ajusta	0,5087	0,2113	2	0	1,0714	Não se ajusta	0,7295	0,1771	2	0,5737	0,201	3
DURAÇÃO															
DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	3 horas			4 horas			8 horas			12 horas			24 horas		
	p-valor	Estatística de teste	Ranking	p-valor	Estatística de teste	ranking	p-valor	Estatística de teste	ranking	p-valor	Estatística de teste	ranking	p-valor	Estatística de teste	ranking
	0,7582	0,1725	7	0,5669	0,237	4	0,6796	0,2167	4	0,6942	0,2377	3	0,8367	0,2578	7
GAMA	0,8879	0,1494	6	0,5608	0,2381	5	0,5019	0,2491	7	0,2776	0,3324	6	0,9859	0,189	1
GEV	0,9707	0,1256	1	0,6004	0,2309	3	0,9524	0,1557	1	0,7778	0,2206	1	0,9583	0,2114	5
GUMBEL	0,9396	0,1368	4	0,697	0,2136	1	0,6396	0,2239	5	0,4047	0,2984	4	0,9723	0,2018	2
LOGNORMAL 2P	0,9594	0,1302	3	0,6842	0,2159	2	0,621	0,2272	6	0,3402	0,3146	5	0,9492	0,2164	6
LOGNORMAL 3P	0,9571	0,1311	2	0,5026	0,249	6	0,9276	0,1643	2	0,7383	0,2288	2	0,9608	0,2099	4
PEARSON 3P	0,921	0,1418	5	0	1,1	Não se ajusta	0,8205	0,1903	3	0	1,125	Não se ajusta	0,9644	0,2076	3

Fonte: Autores (2023).

Considerando a análise de aderência das distribuições, optou-se pela distribuição GEV para o ajuste da equação IDF. Embora esse modelo possua três parâmetros que variam para cada intensidade, a utilização do software ALEA para a estimativa dos mesmos simplifica consideravelmente o processo. Assim, os valores encontrados para os parâmetros de α , β e k estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de forma, escala e posição.

Duração (min)	α	B	k
15	10,210	61,050	-0,150
30	5,515	42,770	-0,201
45	5,353	37,500	-0,235
1	11,450	35,270	0,268
2	8,132	19,470	-0,021
3	5,001	12,230	-0,069
4	1,984	9,440	-0,380
8	1,370	6,589	-0,370
12	0,703	4,886	-0,430
24	1,137	2,683	-0,037

Fonte: Autores (2023).

Os parâmetros "c", "d" e "log A", delineados na seção 2.4, foram determinados por meio da linearização dos logaritmos das intensidades (i) (Figura 2). Em busca de maximizar o coeficiente de determinação (R^2) (valor mais próximo a 1), obteve-se o valor de c igual a 28.

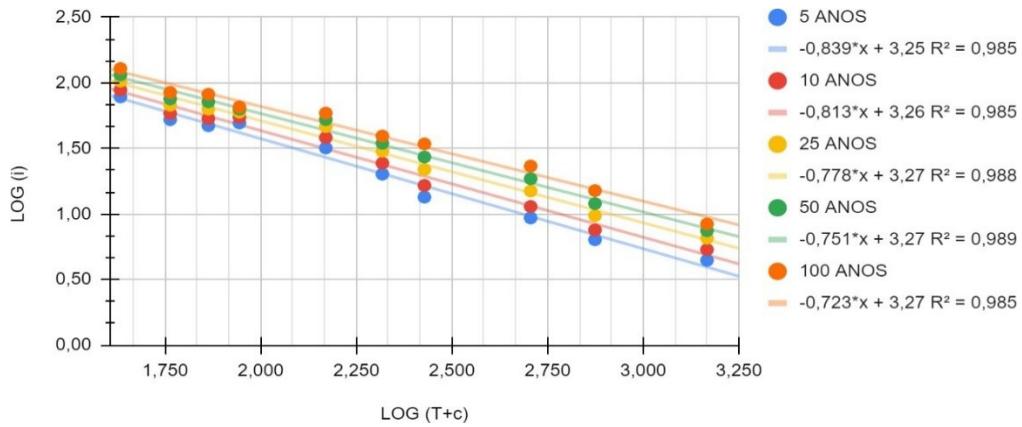


Figura 2 – Linearização - Intensidade (i), duração (t) e parâmetro c.

Fonte: Autores (2023).

Com base nas equações apresentadas na Figura 2, é possível extraí os valores de "Log A" e o parâmetro "d", conforme mencionado na equação 3. Esses valores são, então, compilados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros A, d e Log (T) para cálculo da IDF.

T (anos)	log T	log A	A	d
5	0,698970	3,250	1778,279	0,839
10	1,000000	3,260	1819,701	0,813
25	1,397940	3,270	1862,087	0,778
50	1,698970	3,270	1862,087	0,751
100	2,000000	3,270	1862,087	0,723

Fonte: Autores (2023).

O gráfico apresentado na figura 3, representa a linearização para determinar os parâmetros a e b da equação linear, necessários para individualizar a equação IDF para Juiz de Fora com base nos dados atuais.

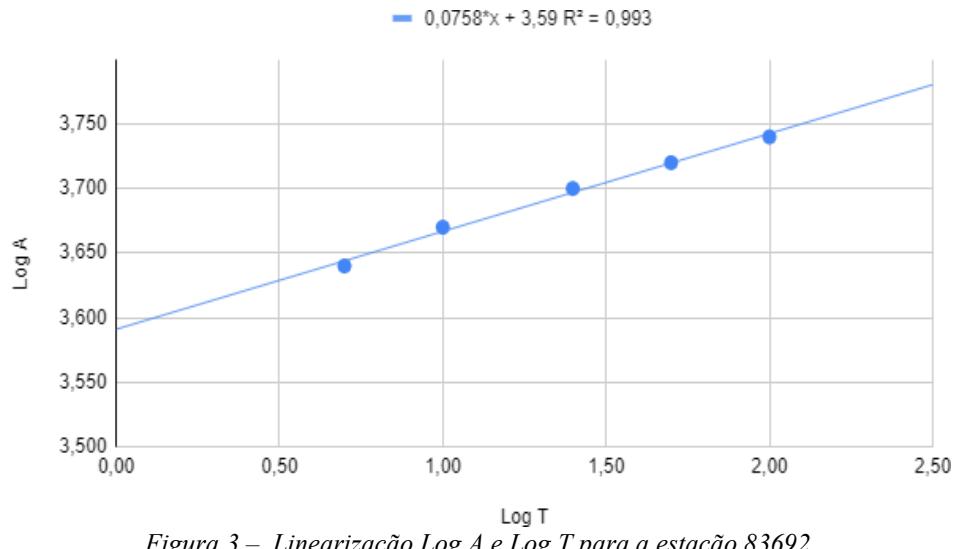


Figura 3 – Linearização Log A e Log T para a estação 83692.
Fonte: Autores (2023).

Os parâmetros "a" e "b" necessários para o ajuste da IDF proposta podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros individuais para a equação IDF ajustada.

Log A	3,24
a	1737,801
b	0,015
c	28
d	0,781

Fonte: Autores (2023).

Com base nos valores apresentados na Tabela 6, obteve-se a equação IDF ajustada para Juiz de Fora (Equação 6)

$$i = \frac{1737,801 \cdot T^{0,015}}{(t + 28)^{0,781}} \quad (6)$$

A fim de realizar uma análise comparativa entre a IDF ajustada e a IDF vigente no município (FREITAS et al., 2021), um gráfico comparativo para o tempo de retorno de 5 anos é apresentado na Figura 4. A IDF vigente na literatura (Equação 7) apresenta resultados de intensidade de chuva superiores à IDF proposta até a intensidade de 60 minutos. Essa superioridade pode ser resumida como: 22,55% para a duração de 10 minutos; 19,77% para a duração de 15 minutos; 13,17% para a duração de 30 minutos, 8,18% para a duração de 45 minutos, 8,18%; e 4,15% para a duração de 60 minutos.

$$i = \frac{3000 \cdot T^{0,173}}{(t + 23,965)^{0,96}} \quad (7)$$

Nota-se que as diferenças supracitadas se mostram decrescentes conforme a duração aumenta até que, a partir da duração de 120 minutos, a equação ajustada passa a apresentar valores superiores em relação à equação IDF vigente. Conforme a duração aumenta, o percentual de diferença entre o modelo proposto e a equação de Freitas et al. (2001) cresce (7,18% para a duração de 2 horas e 65,60% para a duração de 24 horas, por exemplo). Isso pode ser observado na Figura 4.

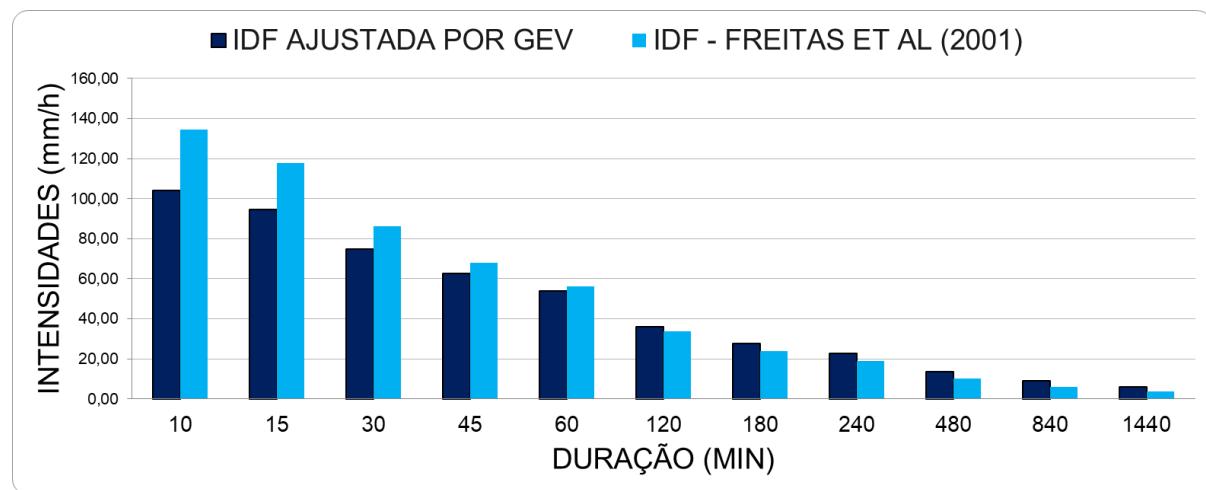


Figura 4 – Gráfico comparativo entre a IDF proposta e a IDF de Freitas et al. (2001) para o tempo de retorno de 5 anos.

Fonte: Autores (2023).

Comportamento semelhante entre a IDF ajustada e a IDF de Freitas et al. (2001) pode ser observado para o tempo de retorno de 10 anos, conforme apresentado na figura 5. Assim, o fato de a equação ajustada demonstrar ser superior à equação vigente em determinadas durações assume grande importância para o dimensionamento de estruturas hidráulicas de drenagem.

O ajuste adequado dos dados para durações acima de 60 minutos pode auxiliar na contenção de prejuízos causados por índices pluviométricos que ocorram por horas. Em vista disso, para minimizar a probabilidade de ocorrência de danos materiais e imateriais, recomenda-se que as diretrizes técnicas adotem a equação ajustada para durações com intervalo superior a 60 minutos. No que se refere aos resultados apresentados para intensidades com menores durações (15, 30, 45 e 60 minutos), recomenda-se a permanência da utilização da equação de Freitas et al. (2001).

A permanência da equação vigente para durações menores pode ser justificada, uma vez que a IDF ajustada apresentou valores inferiores em relação à vigente de até 65,6%, além de não ter sido possível a incorporação dos dados anteriores ao ano hidrológico de 1998/1999. Portanto, em virtude da segurança à população, a adoção da equação vigente para durações iguais ou menores que 60 minutos é recomendada.

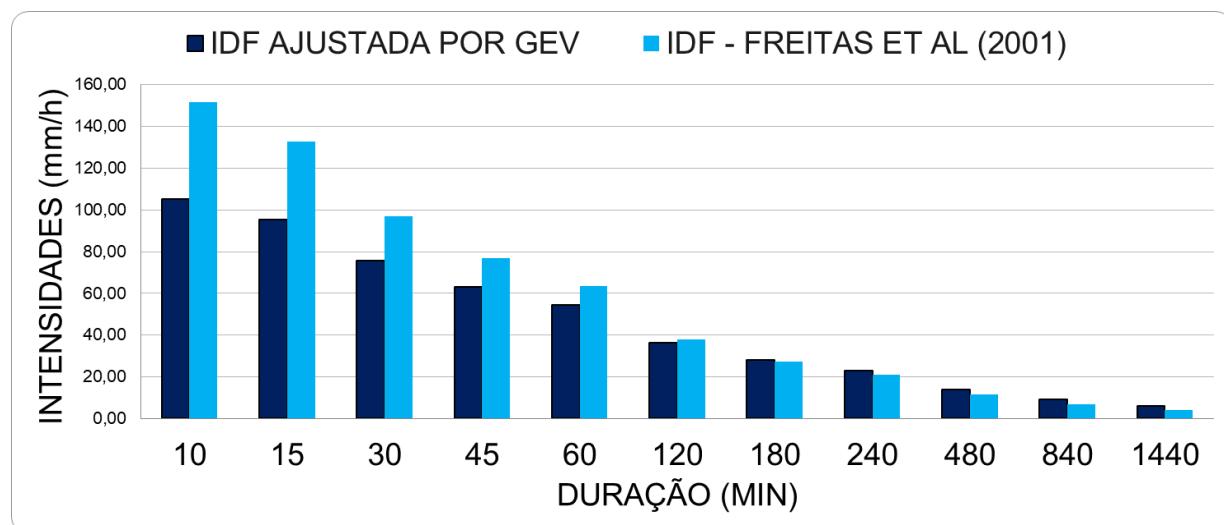


Figura 5 – Gráfico comparativo entre a IDF proposta e a IDF de Freitas et al. (2001) para o tempo de retorno de 10 anos.

Fonte: Autores (2023).

No que se refere às implicações, em termos de diretrizes técnicas de dimensionamento, resultantes da interrelação entre drenagem urbana, precipitação e o dimensionamento de estruturas hidráulicas, a equação IDF desempenha um papel crucial no Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDU). Ao atualizar a equação IDF para refletir com maior precisão as condições climáticas atuais e futuras da cidade, o PDDU estará mais alinhado com a realidade. Em diversos momentos do PDDU do município, o manual apresenta a duração de 60 minutos para o dimensionamento de estruturas de microdrenagem, bem como o tempo de retorno de 10 anos, fato de interessante discussão com os resultados presentes no estudo. Em durações acima de 120 minutos, para o tempo de retorno de 10 anos, houveram indicativos de que a equação atualmente utilizada pode estar defasada perante os dados deste estudo.

Portanto, a atualização da equação IDF no PDDU de Juiz de Fora não apenas melhora a capacidade de prever e gerenciar eventos pluviais, mas também contribui para um planejamento urbano mais resiliente, sustentável e adaptado às mudanças climáticas, promovendo a segurança através de uma melhor gestão de riscos e melhorando a qualidade de vida dos habitantes da cidade.

4. Considerações finais

O propósito deste estudo baseou-se em efetuar uma análise das chuvas intensas na região de Juiz de Fora (MG), por meio de testes estatísticos, com a intenção primordial de oferecer uma revisão à equação Intensidade-Duração-Freqüência (IDF) atualmente empregada no município. Nesse sentido, foi alcançado o objetivo principal de avaliar a aplicabilidade da equação vigente, com base nos dados da série histórica atualizada.

A partir do teste de Mann-Kendall foi possível comprovar tendências de crescimento para as intensidades de chuva com durações superiores a 60 minutos, apontando o impacto das mudanças antrópicas e ambientais ao longo do tempo. Por conseguinte, com base nos dados obtidos, foi possível gerar, por meio da distribuição de GEV, uma nova equação que se ajustasse melhor aos dados pluviométricos. Dessa forma, ao realizar o comparativo entre a equação vigente e a equação ajustada, é notória a superioridade dos valores de intensidade atingidos pela equação atualizada onde encontram-se tendências de crescimento nos dados.

Diante dos resultados obtidos, ressalta-se a necessidade de verificar novamente a aplicabilidade da equação proposta por Freitas et al. (2001), uma vez que nas durações acima de 120 minutos a equação vigente não atinge os valores encontrados na equação ajustada. Dessa forma, para chuvas com durações maiores que uma hora, a equação pode ser considerada menos segura para o dimensionamento, uma vez que a incorporação de dados recentes fez com que intensidades maiores fossem atingidas.

Os resultados apresentados constatam a importância de revisões periódicas das equações IDF, principalmente em localidades que experimentaram grande ascensão populacional e desenvolvimento acelerado nos últimos anos. Nesse

sentido, não obstante a revisão da literatura, torna-se evidente que os desafios associados à drenagem de águas pluviais em áreas urbanas são multifacetados e abrangentes. Ainda que não ocorram tendências significativas, a realização de estudos semelhantes a este são de extrema importância para garantir a qualidade de vida da população. Cabe destacar que um problema comum é a ausência de profissionais capacitados para relacionar a aplicação de conceitos de hidrologia, contudo ainda há fatores de ordem econômica e política a serem considerados. Assim, a compreensão dos dados em âmbito regional é fundamental para a compreensão das alterações nos espaços urbanos e como esse fato implica na vida da população.

Agradecimentos

Expressamos nossos sinceros agradecimentos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), por meio da Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPI) e do Departamento de Engenharia Urbana (DEURB), pelo apoio técnico e financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos também ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização dos dados pluviométricos utilizados neste estudo.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA).[s.d]. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 10/03/2023.
- AGUIAR, V. G. de. (2009). Bacia hidrográfica do córrego granada– Aparecida de Goiânia– GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana. (2009). 95 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnologia, Estruturas e Construção Civil)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.
- BRASIL (2023). INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 01/03/2023.
- CARDOSO, J. de C. (2021). Estudo das chuvas intensas na região metropolitana de Belo Horizonte sob a ótica da equação intensidade-duração-frequência (IDF). 74 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- CANHOLI, A.P. (2015). Drenagem urbana e controle de enchentes. Editora Oficina de Textos. 384 p.
- CASTELHANO, F. J. (2020). O clima e as cidades. Editora Intersaber. 260 p.
- CIRIGLIANO, Raphael. Relatório apresentado ao senhor Governador do Estado pelo Prefeito Raphael Cirigliano – exercício de 1940. Juiz de Fora: Companhia Dias Cardoso, 1940.
- DE OLIVEIRA MACHADO, P.J.; BATISTA DA CUNHA, S.; Juiz de Fora: inundações, saneamento e ordenamento territorial. Revista Geográfica da América Central, v.2, 2011.
- FERREIRA, S.R.M. (2022). Inundações em meio urbano: o caso da cidade de Olhão. 177 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física – Ambiente e Ordenamento do Território) – Universidade de Coimbra, Coimbra.
- PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. Defesa Civil divulga balanço do período chuvoso de 2023-2024. . Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/>. Acesso em: 15/01/2025.
- FRAGOSO, G. A.; SILVA, F. P.; SILVA, J. C. C.; ALVES, A. F.; CARVALHO, B. G. P.. Planejamento, ordenamento e gestão integrada. Diagnóstico do sistema de drenagem urbana da cidade de Belém, Pará: uma análise dos principais bairros da cidade. Brasília, 2016.
- FREITAS, A. J.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; PINTO, F. A.; PEREIRA, S. B.; FILHO, R. R. G.; TEIXEIRA, A. F.; BAENA, L. G. N.; MELLO, L. T. A.; NOVAES, L. F. (2001). Equações de Chuvas Intensas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- GERHEIM, D. K. M. (2016). Alagamentos, enxurradas e inundações na área urbana de Juiz de Fora: Um Olhar Sobre as Bacias Hidrográficas dos Córregos São Pedro e Ipiranga. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

-
- HIDROWEB - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 10/03/2023.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE CIDADES. (2022). Disponível em: cidades.ibge.gov.br. Acesso em: 28/02/2023.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE CIDADES. (2021). Disponível em: cidades.ibge.gov.br. Acesso em: 28/02/2023.
- JÚNIOR, J. B. C.; LUCENA, R. L. (2020). análises das precipitações pelos testes não paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis. Mercator (Fortaleza), v. 19, 2020.
- GUIMARÃES, M. M; SILVA, M.P; FLORENTINO, W.G; DIAS, R.S; JUNIOR, F.C.F.O; PEREIRA, I. A; LIMA, V. O; ELÁDIO, B.H.F.L.P. (2020). Uso de telhados verdes na mitigação de cheias de uma bacia hidrográfica urbana com alta frequência de inundações. Brazilian Journal of Development (Curitiba), v.6, 2020.
- KENDALL, M. G. (1975). Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin, 1975.
- LORENZOTTI, M. (2020). Intervenção urbanística na várzea do Rio Paraíba do Sul, plano geral para um Parque Agroambiental. 2020.
- MANN, H. B. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrica*, v.13, p.245-259, 1945.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. (2007). Hidrologia estatística. CPRM, 2007, 552 p.
- NASCIMENTO, A. S.; ABADE, D. S. O.; CASTRO, G. A.; OLIVEIRA, J. G.; CASTRO, K. D. R.; TERODORO, M. R. (2017). Análise de chuvas intensas para o município de Belo Horizonte: impactos na drenagem urbana. 98f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- NUNES, A. A. (2018). Tendências em eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana de Belo Horizonte: detecção, impactos e adaptabilidade. 191f. Tese (Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018
- OLIVEIRA, M. A. B. (2017). Identificação de eventos agrícolas a partir de tendências de precipitações no semiárido. 52 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Sistemas Agroindustriais)- Programa de Pós-Graduação em Sistemas Agroindustriais, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2017
- TORRES, F. T. P. (2006). Relações entre fatores climáticos e ocorrências de incêndios florestais na cidade de Juiz de Fora (MG). *Caminhos de Geografia*, 7(18), 162-171.
- ZAREKARIZI, M.; RANA, A.; MORADKHANI, H. (2018). Precipitation extremes and their relation to climatic indices in the Pacific Northwest USA. *Climate Dynamics*, 50 (11), 4519-4537.