

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS PARA APLICAÇÃO EM BACIAS NÃO MONITORADAS: ESTUDO NA BACIA DO RIO IVAÍ (PR)

José Luísa João Chaora¹
Samuel José Marquês Timano²
Daniel Enrique Guauque Mellado³
Frank Duarte Ussivane⁴
Renato Antônio da Silva⁵
Carlos Rogério de Mello⁶

RESUMO

Este estudo justifica-se pela necessidade de estimar vazões mínimas em bacias hidrográficas não monitoradas, informação essencial para o planejamento e a gestão de recursos hídricos. Nesse contexto, teve como objetivo realizar a regionalização de vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Ivaí, localizada no estado do Paraná, visando sua aplicação em bacias não monitoradas. Foram utilizadas séries históricas de dados fluviométricos de nove postos, referentes ao período de 1985 a 2019, as quais foram submetidas a análises de consistência e ao preenchimento de falhas. A metodologia adotada incluiu o ajuste de sete distribuições de probabilidade, a caracterização fisiográfica das sub-bacias e a definição de regiões hidrologicamente homogêneas por meio de técnicas de análise multivariada, com destaque para a Análise de Componentes Principais (PCA) e o agrupamento pelo método K-means. A partir da análise conjunta das variáveis hidrológicas e fisiográficas, foram identificadas três regiões homogêneas com padrões distintos de comportamento hidrológico. Dentre as distribuições avaliadas, a Generalized Extreme Value (GEV) apresentou o melhor desempenho na maioria dos postos, demonstrando maior capacidade de representação de eventos extremos e assimetrias das séries. Para cada região homogênea, foram ajustadas equações de regionalização por meio de modelos de regressão linear, que apresentaram elevado desempenho estatístico, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,89 e índices de eficiência Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) e Kling-Gupta Efficiency (KGE) acima de 0,87 e 0,78, respectivamente. Os resultados obtidos evidenciam a eficiência da abordagem metodológica, permitindo a estimativa confiável de vazões mínimas em bacias não monitoradas e fornecendo subsídios relevantes para a gestão de recursos hídricos e a mitigação de riscos associados a eventos hidrológicos extremos.

Palavras-chave: Distribuições de Probabilidade; Regiões Hidrologicamente Homogêneas; Recursos Hídricos

¹ Doutorando em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, jose.chaora@estudante.ufla.br;

² Doutorando em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, samuel.timano1@estudante.ufla.br;

³ Doutorando em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, daniel.mellado1@estudante.ufla.br;

⁴ Doutorado em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, frank.ussivane1@estudante.ufla.br;

⁵ Técnico do Departamento do Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras - UFLA, renato.silva@ufla.br;

⁶ Professor orientador: Departamento de Recursos Hídricos - UFLA, crmello@ufla.br.

INTRODUÇÃO

A caracterização de eventos extremos de vazão é fundamental para o planejamento hídrico, a gestão de recursos e a mitigação de riscos em bacias hidrográficas. Nesse contexto, as vazões mínimas assumem papel estratégico, especialmente em períodos de estiagem, sendo amplamente utilizadas em processos de outorga, avaliação da disponibilidade hídrica e manutenção de ecossistemas aquáticos. Indicadores como a vazão mínima de sete dias com período de retorno de dez anos (Q7,10) e a vazão média de longo termo (QMLT) são parâmetros essenciais para o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos (Tucci, 2013; ANA, 2019).

A regionalização hidrológica surge como uma abordagem eficaz para suprir a escassez de dados em regiões com monitoramento insuficiente, permitindo a transferência de informações de estações fluviométricas para locais sem dados ou com séries históricas limitadas. Essa técnica possibilita a estimativa de variáveis hidrológicas a partir de relações com características fisiográficas das bacias, sendo amplamente aplicada no dimensionamento de obras hidráulicas e no suporte à tomada de decisão (Tucci, 2002; Naghettini e Pinto, 2007).

A bacia hidrográfica do rio Ivaí destaca-se pela sua importância regional e pelo uso intensivo dos recursos hídricos em atividades como agricultura, abastecimento público e geração de energia. Seu regime hidrológico é influenciado por variações climáticas sazonais, diversidade geomorfológica e acentuado gradiente altimétrico, resultando em elevada heterogeneidade espacial das vazões. Nesse cenário, o desenvolvimento de modelos de regionalização confiáveis torna-se essencial para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos.

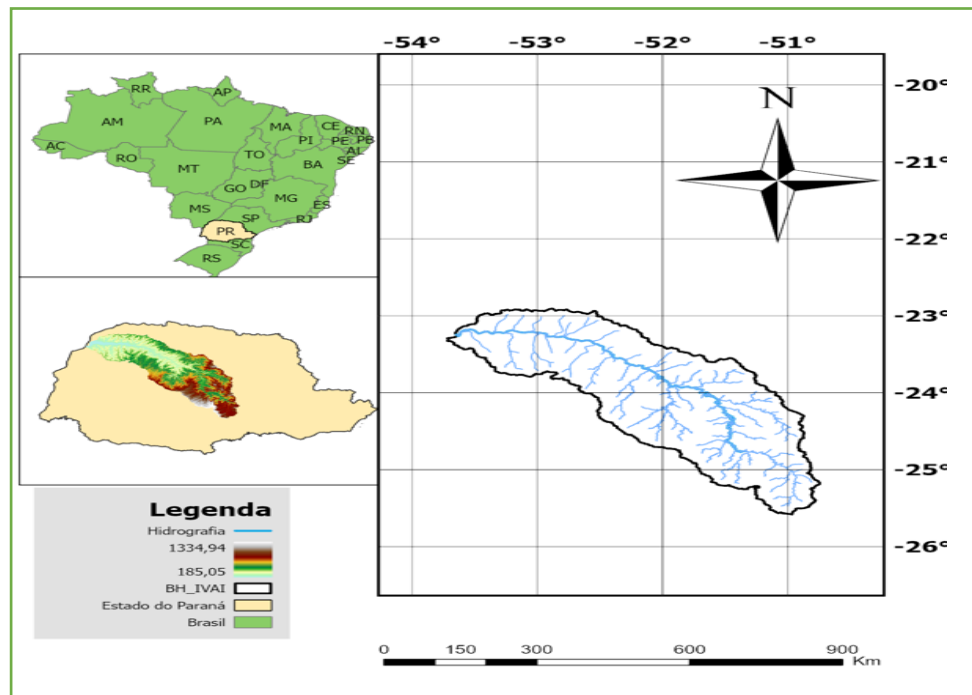
Diante disso, o presente estudo tem como objetivo realizar a regionalização de vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Ivaí, visando sua aplicação em bacias não monitoradas. Para tal, foram analisadas séries históricas de vazão no período de 1985 a 2019, provenientes de nove estações fluviométricas. Foram ajustadas diferentes distribuições de probabilidade, que inclui a Generalized Extreme Value (GEV), Lognormal (2P e 3P), Gumbel, Gamma, Log-Pearson tipo III e Weibull, com o intuito de caracterizar os regimes de vazões extremas. Adicionalmente, foram avaliadas relações entre variáveis hidrológicas e atributos fisiográficos das sub-bacias, visando à definição de regiões hidrologicamente homogêneas.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado, na bacia hidrográfica do rio Ivaí no estado do Paraná, região Sul do Brasil (S 22°56'17" - 25°35'27" e W 50°44'17" - 53°41'43") e está inserida inteiramente no território

paranaense, abrangendo uma área aproximadamente 36.587 km², com grande variabilidade climática e fisiográfica. (Figura 1). O clima predominante é subtropical úmido, segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e invernos moderados (Alvares *et al.*, 2013). A bacia apresenta relevo variando de planícies aluviais a regiões de escarpa, o que influencia diretamente o regime hidrológico e a resposta aos eventos de estiagem. A rede de drenagem é monitorada por estações fluviométricas operadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA.

Figura 1. Localização da área de estudo



Fonte: autores (2026)

MATERIAIS E MÉTODOS

Base de Dados

Foram utilizados dados de 9 estações fluviométricas de vazões diárias provenientes da base Hidroweb 3.2 (ANA). As séries foram submetidas a análise de consistência, e preenchimento de falhas curtas por regressão linear, séries com mais de 20 anos de dados e com menos de 10%, seguindo recomendações de Naghettini e Pinto (2007). Paralelamente, foram adicionadas informações fisiográficas das sub-bacias associadas a cada estação, incluindo área (km²), perímetro (km), altitude média (m), precipitação (mm) e densidade de drenagem (km.km⁻²).

Determinação da precipitação média na bacia

Neste estudo, a precipitação média anual foi determinada por meio do método dos polígonos de Thiessen, amplamente utilizado em estudos hidrológicos para a espacialização de dados pluviométricos distribuídos de forma irregular (Chow; Maidment; Mays, 1988).

A precipitação média na bacia foi calculada por meio de uma média ponderada, na qual os pesos correspondem às áreas de influência de cada posto pluviométrico, conforme a Equação 1. Esse procedimento permite incorporar a variabilidade espacial da precipitação, proporcionando estimativas mais representativas para a área de estudo.

$$P_{\text{média}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

em que:

- P_i = precipitação média anual observada no posto i ;
- A_i = área do polígono de Thiessen correspondente ao posto i , recortado pela área da bacia;
- n = número de postos considerados.

Ajuste de distribuições estatísticas

Foram ajustadas sete distribuições extremas a cada série de vazão: GEV (Generalized Extreme Value), Lognormal 2P, Lognormal 3P, Gumbel, Gamma, Log-Pearson III e Weibull. O ajuste priorizou o método de L-moments, considerado mais estável e menos sensível a valores extremos (Coles, 2001; Katz *et al.*, 2002). E para avaliação do desempenho das distribuições foram usadas as seguintes métricas estatísticas: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Kling-Gupta Efficiency (KGE) e Root Mean Square Error (RMSE).

Regionalização de vazões

A regionalização hidrológica busca transferir informações entre bacias com características semelhantes, permitindo estimar vazões de referência em locais sem monitoramento. Após a definição das regiões homogêneas por PCA + K-means, procedeu-se à regionalização das vazões mínimas e média de longo termo por meio de modelos de regressão linear relacionando as características fisiográficas das sub-bacias com as vazões características de cada estação fluviométrica. As estações foram agrupadas em regiões homogêneas considerando: L-momentos (τ_2 e τ_3) QMLT e atributos fisiográficos. O agrupamento foi realizado no ambiente de python via PCA + K-means com o número de clusters definido.

Variáveis dependentes e independentes

As variáveis dependentes utilizadas para a regionalização foram: Vazão Média de Longo Termo (QMLT), Vazão mínima de 7 dias associada ao período de retorno de 10 anos (Q7,10), e vazão com permanência de 95% (Q95). As variáveis independentes (fisiográficas e climáticas) extraídas para cada sub-bacia foram: Área (km²) Perímetro (km), Altitude média (m), Latitude / Longitude, Precipitação média anual (mm) e densidade de drenagem (Dd km.km⁻²).

Regressão linear simples

Para cada quantil de interesse (Q7,10, Q95 e QMLT), ajustou-se um modelo de regressão linear simples, conforme apresentado na Equação 2, utilizando os atributos fisiográficos das bacias hidrográficas como variáveis preditoras. As equações obtidas possibilitam a estimativa das vazões em locais não monitorados, constituindo uma ferramenta importante para estudos de regionalização hidrológica e gestão dos recursos hídricos (Lacerda *et al.*, 2025; Santos, 2012). A aplicação da regressão linear simples fundamenta-se nas recomendações de Tucci (2002) e Naghettini e Pinto (2007), que destacam sua ampla utilização na modelagem de relações entre características físicas das bacias e variáveis hidrológicas.

$$Q = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2)$$

A escolha entre regressão linear foi feita com base no critério BIC (*Bayesian Information Criterion*), que penaliza modelos superparametrizados e favorece modelos parcimoniosos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados fluviométricos

Na bacia hidrográfica do rio Ivaí existem 17 postos fluviométricos. Após a análise de consistência dos dados e o preenchimento de falhas para os postos com menos de 10% de ausências, referentes ao período de 1985 a 2019, foram selecionados nove postos fluviométricos, os quais foram utilizados como base de dados para o processo de regionalização.

Ajuste de distribuições estatísticas

Foram ajustadas sete distribuições de probabilidade às séries históricas de vazão mínima dos nove postos fluviométricos analisados, envolvendo os modelos GEV, Lognormal 2P, Lognormal 3P, Gumbel, Gamma, Log-Pearson III e Weibull. A avaliação do desempenho estatístico foi definida por meio de métricas como Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Kling-Gupta Efficiency (KGE) e Root Mean Square Error (RMSE), permitindo identificar a distribuição mais representativa para cada posto (Tabela 1).

Tabela 1: Melhor ajuste da distribuição

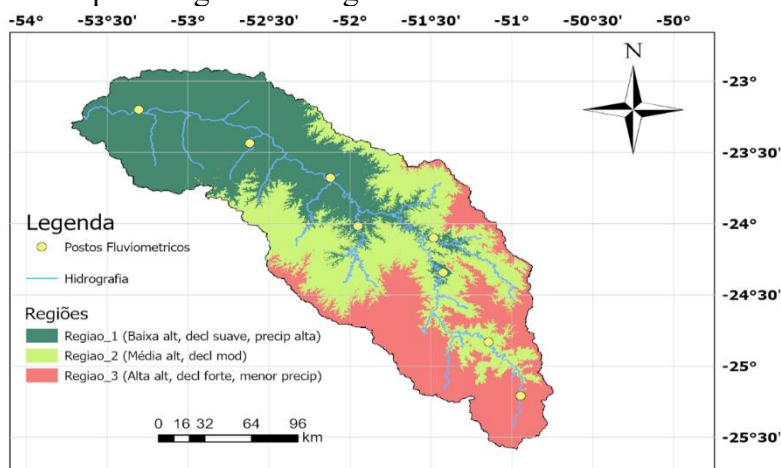
Estação	Melhor Distribuição	BIC	NSE	KGE	RMSE
64675002	GEV_MLE	181000,3	0,85	0,75	252,19
64620000	GEV_MLE	109032	0,87	0,74	14,88
64659000	GEV_MLE	132558,4	0,82	0,67	58,48
64685000	GEV_MLE	183747,6	0,81	0,76	289,89
64625000	GEV_MLE	134641,2	0,82	0,67	60,35
64693000	Lognormal 3P	187408,8	0,78	0,75	349,01
64655000	GEV_MLE	167307,7	0,82	0,71	177,95
64660500	GEV_MLE	178689,6	0,84	0,73	244,42
64652000	GEV_MLE	108332,2	0,84	0,71	18,01

Os resultados obtidos indicam que a superioridade da distribuição Generalized Extreme Value-Maximum Likelihood Estimation (GEV_MLE) verificada para a maior parte dos postos analisados é consistente com a literatura hidrológica. Estudos como os de Coles (2001) e Katz *et al.* (2002) destacam que a GEV_MLE apresenta elevada capacidade de representar séries assimétricas e eventos extremos, o que explica seu bom desempenho para vazões mínimas. Em aplicações brasileiras, Naghettini e Pinto (2007) e Blain (2015) também apontam a GEV como o modelo mais robusto para análises de frequência, principalmente quando há variabilidade acentuada e presença de caudas pesadas, características identificadas neste estudo.

Regiões homogêneas

A regionalização permitiu identificar regiões hidrologicamente homogêneas, possibilitando o ajuste de equações de regressão com elevado desempenho estatístico ($R^2 > 0,89$; $NSE > 0,87$; $KGE > 0,78$). Esses resultados corroboram com estudos que destacam a eficiência da regionalização na estimativa de vazões em bacias não monitoradas (Tucci, 2002; Naghettini e Pinto, 2007).

Figura 2: Mapa de regiões homogêneas



Fonte: autores (2026)

A região 1, apresenta maior uniformidade fisiográfica, com bacias mais amplas e menores variações de altitude. Essa configuração tende a gerar respostas hidrológicas mais amortecidas, com maior estabilidade das vazões mínimas ao longo do tempo. Esse comportamento é coerente com resultados de regionalizações em bacias de relevo suave, como relatado por Naghettini e Pinto (2007).

A região 2 agrupa bacias com características intermediárias, onde a variabilidade fisiográfica e hidrológica é mais pronunciada. O comportamento não linear das vazões mínimas, evidenciado pelos expoentes mais acentuados nos modelos log-log, indica forte influência das características geométricas do relevo, alinhando-se ao observado por Morais *et al.* (2020), que destacam o papel do gradiente altimétrico e da estrutura da rede de drenagem na geração de vazões mínimas. Nesta região, os ajustes lineares apresentaram maior dispersão, reforçando a necessidade de modelos multiplicativos.

A região 3 concentra bacias de maior altitude relativa e maior dissecação do relevo, resultando em hidrogramas mais variáveis e menor capacidade de sustentação de vazões mínimas. Esse padrão está associado a respostas rápidas aos eventos pluviométricos, comportamento frequentemente descrito na literatura para bacias montanhosas e altamente drenadas (Tucci, 2007). Assim, as equações regionais dessa região apresentaram relações mais sensíveis às variáveis morfométricas, refletindo maior complexidade hidrológica.

De modo geral, a divisão em três regiões homogêneas mostrou-se adequada para representar a variabilidade espacial das vazões mínimas, permitindo ajustar equações regionais mais estáveis e coerentes com a estrutura ambiental da bacia (Tabela 2).

Tabela 2. Regressão linear simples.

Regiões	Distribuição ajustada	Variáveis	Equações	Desempenho		
				R ²	NSE	KGE
I	GEV	QMLT	$=148.66-0.038xA+0.234xP-0.294xAlt+113.623xDd$	0,94	0,93	0,83
		Q95	$=567.98-0.143xA+0.856xP-1.126xAlt+434.101xDd$			
		Q7,10	$=332.75-0.067xA+0.3168xP-0.634xAlt+254.314xDd$			
II	GEV	QMLT	$=0.03+0.220xA+3.083xP-6.077xAlt+0.091xDd$	0,89	0,87	0,88
		Q95	$=0.012+0.702xA+9.452xP-19.023xAlt+0.283xDd$			
		Q7,10	$=0.009+0.501xA+6.682xP-13.567xAlt+0.201xDd$			
III	Lognormal 3p	QMLT	$=0.006+0.016xA+0.509xP+1.594xAlt+0.004xDd$	0,97	0,93	0,96
		Q95	$=0.019-0.019xA+1.626xP+5.101xAlt+0.012xDd$			
		Q7,10	$=0.013+0.01624xA+1.187xP+3.309xAlt+0.018xDd$			

Na Região I, a distribuição GEV apresentou o melhor ajuste para todas as estatísticas de vazão (QMLT, Q95 e Q7,10), indicando presença de forte assimetria e caudas mais pesadas, típicas de áreas com maior variabilidade hidrológica. O desempenho foi elevado (R² = 0,94; NSE = 0,93; KGE =

0,83), e os coeficientes das equações revelam influência significativa da morfometria, especialmente altitude (negativa) e perímetro (positiva), em conformidade com estudos como Naghettini e Pinto (2007).

A Região III apresentou o melhor desempenho geral, com destaque para a Lognormal 3P ($R^2 = 0,97$; $NSE = 0,93$; $KGE = 0,96$). Isso reflete regime hidrológico mais regular, com menor influência de extremos. A influência positiva de área e perímetro e o papel dominante da altitude são coerentes com estudos clássicos como Vogel e Wilson (1996).

CONCLUSÃO

A regionalização das vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Ivaí, Paraná, evidenciou a importância de combinar análise fisiográfica e ajuste de distribuições probabilísticas para estimativas hidrológicas confiáveis. A Generalized Extreme Value (GEV) destacou-se como a distribuição mais adequada na maioria dos postos, refletindo sua capacidade de representar séries assimétricas e eventos extremos, enquanto outras distribuições apresentaram desempenho inferior.

Os resultados evidenciam que a abordagem adotada fornece suporte sólido para gestão de recursos hídricos, planejamento hidráulico e mitigação de riscos hidrológicos. Além disso, as equações e regiões definidas podem servir de referência para estimativas de vazões mínimas em bacias não monitoradas, ampliando a aplicabilidade prática da regionalização e contribuindo para a tomada de decisão em engenharia, conservação ambiental e planejamento hídrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências CAPES (código 001), CNPq e FAPEMIG, ao Programa de Pós-graduação em recursos hídricos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Manual de procedimentos técnicos para outorga de uso da água**. Brasília: ANA, 2019.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 23 jun. 2026.

- BLAIN, G. C. Considerações estatísticas sobre a utilização da distribuição de valores extremos generalizada (GEV) em estudos hidrológicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 30, n. 1, p. 1-12, 2015.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- COLES, S. **An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values**. London: Springer, 2001.
- KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, [S. l.], v. 25, n. 8/12, p. 1287–1304, 2002.
- LACERDA, H. F.; DA SILVA, J. B. L.; DA SILVA, D. P. Regionalização Conjunta de Vazões das Bacias Hidrográficas dos Rios Peruípe, Itanhém e Jucuruçu. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 18, n. 4, p. 3190–3208, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.4.p3190-3208>. Acesso em: 23 jun. 2026.
- MORAIS, M. A. V. *et al.* Regionalization of reference streamflows for the Araguaia River basin in Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 41, n. 3, p. 829–846, 2020. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/36430>. Acesso em: 9 dez. 2025.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- SANTOS, P. dos R. **Análise de frequência e regionalização de vazões máximas sazonais na Região Sul do Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: ANEEL-UFRGS, 2002.
- VOGEL, R. M.; WILSON, I. Probability distribution of annual maximum, mean, and minimum streamflows in the United States. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 1, n. 2, p. 69–76, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:2\(69\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:2(69)). Acesso em: 23 jun. 2026.