

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE PRECIPITAÇÃO POR ÁREA PARA FATOR DE REDUÇÃO DE ÁREA POR CENTRO DE EVENTO DE TEMPESTADE – ESTUDO DE CASO DE TEMPESTADES SEVERAS EM BELO HORIZONTE - MG

Gustavo Duque Thomaz Mourão Elias¹ ; Francisco Eustáquio Oliveira e Silva²

RESUMO – Fatores de Redução de Área (ARFs, sigla em inglês para *Areal Reduction Factors*) são comumente empregados para a modelagem da distribuição espacial de chuvas de projeto. Para projetos hidráulicos envolvendo PMP, os ARFs utilizados costumam ser provenientes de estudos utilizando o método de centro de evento de tempestade, o qual consiste no cálculo de valores de ARF médio de vários eventos de tempestade. Anteriormente, o seu cálculo utilizava a interpolação de isoietas para definir a precipitação média por área, mas tal técnica teve de adaptar para a utilização de produtos de *grid*, no qual foi convencionado o uso de geometrias regulares de centro fixo para o seu cômputo. Neste estudo, foram avaliadas três formas diferentes para o cálculo da precipitação média por área no centro de evento de tempestade: quadrados de centro-fixos; quadrado sem centro definido (“centro-móvel”); e elipses de centro-fixos. Os resultados demonstram que o uso de geometrias regulares com centro fixo pode levar a uma pequena subestimação de, em média, 8% do valor do ARF final para as áreas analisadas (até 225 km²), com a diferença sendo menor entre as duas outras (3%). Para estudos futuros, recomenda-se a avaliação de tais diferenças entre geometrias para áreas maiores.

Palavras-Chave – Fator de Redução de Área, Centro de evento de tempestade, Precipitação Máxima Provável.

ABSTRACT– Areal Reduction Factors (ARFs) are commonly employed for modeling the spatial distribution of design rainfall. For hydraulic projects involving PMP, ARFs are typically derived from storm-centered studies, which consists of calculating mean ARF values from various storm events. Previously, its calculation utilized isohyetal interpolation to define areal-average precipitation, but it has been adapted for grid-based products, establishing the use of fixed-center regular geometries for its computation. In this study, three different methods for calculating areal-average precipitation in the storm-centered approach were evaluated: fixed-center squares; squares without a defined center (“moving-center”); and fixed-center ellipses. The results demonstrate that the use of fixed-center regular geometries can lead to a slight underestimation of, on average, 8% of the final ARF value for the analyzed areas (up to 225 km²), with the difference being smaller between the other two (3%). For future studies, it is recommended to evaluate such differences for larger areas.

Key-words – Areal Reduction Factor, Storm centered, Probable Maximum Precipitation

1) Mestre em Recursos Hídricos pelo PPG-SMARH, UFMG: Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Belo Horizonte - MG (33) 99121 7813, gustavodme@gmail.com

2) Professor da Escola de Engenharia e do PPG-SMARH, UFMG: Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Belo Horizonte – MG, (31) 3409-1873, fsilva@ehr.ufmg.br.

INTRODUÇÃO

No projeto de estruturas hidráulicas de grande porte, como vertedouros de grandes barragens, a definição das dimensões e análise das condições de funcionamento são realizadas, muitas vezes, a partir de estimativas de intensidade associadas à Precipitação Máxima Provável (PMP) (Martin *et al.*, 2024). Contudo, para a caracterização da chuva de projeto, também é necessário definir a duração e a distribuição espaciotemporal da intensidade sobre a bacia analisada.

Em relação à distribuição espacial, os de Fatores de Redução de Área (ARF, sigla em inglês de *Areal Reduction Factors*) são a alternativa usualmente empregada quando a modelagem hidrológica requerida ocorre em modo concentrado. Eles descrevem a relação entre uma estimativa pontual e a precipitação média em área, convertendo tal estimativa em uma precipitação média para a duração e área de interesse (Pietersen *et al.*, 2023)

Dentre os métodos descritos na literatura para estimativa do ARF, o denominado centro de evento de tempestade é prevalente, em especial, quando se assume como referência à altura de chuva associada a PMP (Wright *et al.*, 2014). Nele, o ARF é computado através da identificação espacial da maior altura precipitada, para uma duração específica, em um evento de chuva extrema. Então, a razão entre chuva média observada em determinada área e a pontual máxima é identificada para uma série de tempestades (Svensson e Jones, 2010 *apud* Thorndahl *et al.*, 2019). Diferentemente de outros métodos, como variações do método de área-fixa ou métodos analíticos, as estimativas de ARF produzidas por ele não costumam ser associadas à frequência (Sivapalan e Blöschl, 1998).

Anteriormente, o cálculo da precipitação por área para o cálculo do ARF era feito através da interpolação de isoietas de tempestade. Contudo, à medida que o poder computacional foi avançando e técnicas de interpolação mais sofisticadas se tornaram a praxe para análise espacial de chuva, os produtos de *grid* foram convencionados como padrão para tal aplicação. Todavia, com essa mudança, foi necessário definir novos procedimentos para o cálculo de precipitação média por centro de evento. Alguns estudos convencionaram a adoção de formas geométricas regulares sobrepostas ao centro do evento (Martins *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2013; Thorndahl *et al.*, 2019) enquanto outros estudos se preocuparam em definir novas formas para adereçar algumas das dificuldades clássicas do método, como o movimento da tempestade (Rosin *et al.*, 2024) ou a multiplicidade de centros (Asquith e Famiglietti, 2000; Biondi *et al.*, 2021).

Diante desse contexto, o presente estudo se propõe a identificar a diferença imposta às estimativas dos fatores de redução de área obtidas a partir do método do centro de tempestade, associadas a definição da área de referência decorrente: (i) da adoção de diferentes formas

geométricas (quadrado *versus* elipse); e (ii) da fixação espacial ou não dessa geometria em função do centro da tormenta (somente quadrado). As tempestades severas analisadas foram observadas no município de Belo Horizonte ao longo da última década.

MATERIAL E MÉTODOS

Rede de monitoramento e identificação de tempestades

A rede do estudo é constituída por 78 pluviômetros automáticos, com discretização temporal de 10 min, composta por 36 pluviômetros da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) e 42 do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN). A série histórica comum da rede começa em janeiro de 2015, com término em novembro de 2024. Nessa década, diversos eventos de chuva extrema foram observados no município, com destaque às ocorridas em janeiro de 2020 (Caputo e Siqueira, 2020). O mapa da rede de monitoramento está apresentado na Figura (2).

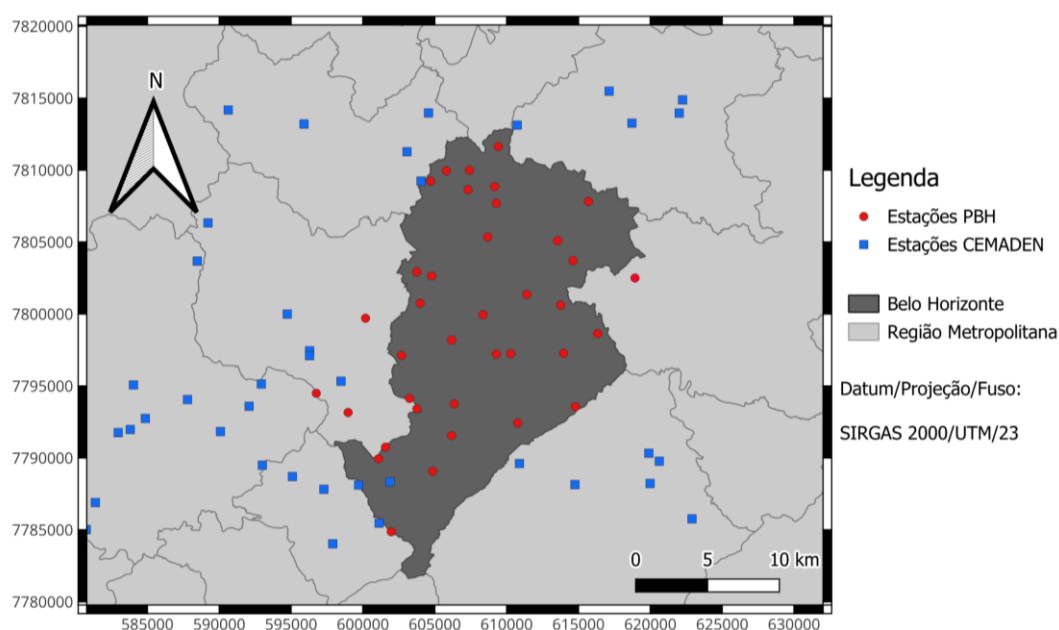


Figura 1 – Mapa da rede de monitoramento pluviométrico da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Para a identificação de eventos severos, a curva IDF de Pinheiro e Naghettini (1998) foi considerada, a fim de garantir que, para as durações analisadas, a intensidade pontual máxima fosse igual ou superior à associada ao tempo de retorno de 10 anos para a duração do evento analisado. Eventos cujo centroide localizavam-se próximo aos limites da rede hidrométrica foram excluídos da análise. O *grid* estimado, cuja resolução espacial foi de 1 km, foi obtido a partir da interpolação dos

registros pontuais via IDW (*Inverse Distance Weighting*). O ponderador foi estimado para cada intervalo de 10 min, através da validação cruzada *Leave-One-Out* (LOOCV).

Cálculo do Fator de Redução de Área e geometrias de referência analisadas

O cálculo do fator para uma tempestade começa a partir da definição de seu “centro” – local onde houve maior altura pluviométrica acumulada dentro do intervalo de tempo analisado. O fator, então, dá-se como uma razão entre a estimativa de precipitação média para uma dada área e essa estimativa pontual, como descrito na Equação (1):

$$ARF(A, d) = \frac{C(A, d)}{R_c(d)} \quad (1)$$

em que *ARF* é o Fator de Redução de Área; *d* é a duração; *A*, a área; *C* é a precipitação média por área e *R_c* é a precipitação no centro da tempestade. O valor final do ARF por centro de evento é dado como a média dos valores de fator obtidos para tempestades de durações similares.

Para definição das áreas de referência para o cálculo de precipitação por área, foram analisadas três formas geométricas diferentes: quadrados regulares sobre um centro-fixo, com o último trabalho os utilizando sendo Thorndahl *et al.* (2019); o “centro-móvel”, proposto por Biondi *et al.* (2021); e as elipses de centros fixos, propostas originalmente por Olivera *et al.* (2008). Um exemplo de aplicação das formas pode ser visto na Figura (2). Para as formas regulares, as áreas de análise foram de 9 km², 25 km², 49 km², 81 km², 121 km², 169 km² e 225 km². Sua definição foi motivada pelos limites da rede hidrométrica, visto que áreas maiores corriam o risco de extrapolar a extensão da rede em eventos cujo centro estivesse mais próximo a sua borda.

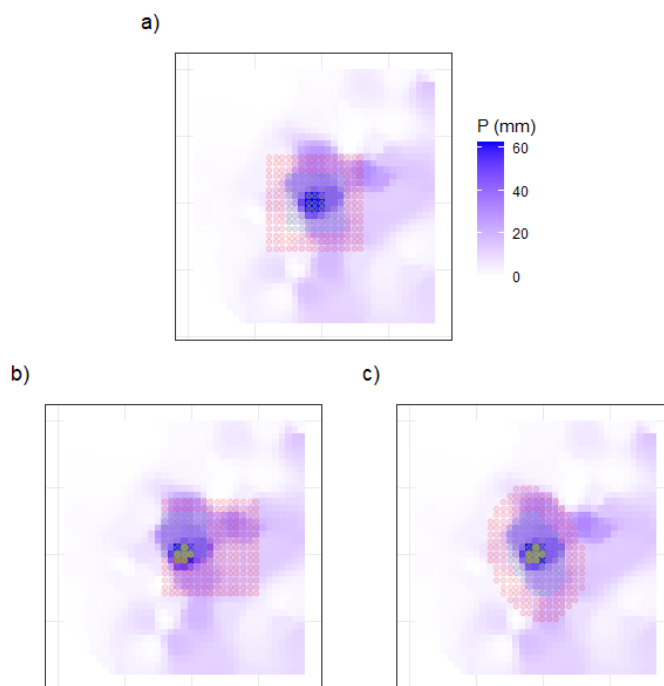


Figura 2 – Definição das áreas de referência para cálculo de precipitação sobre a mesma: a) centro-fixo; b) centro-móvel; e c) elipses.

O centro-móvel também utiliza geometria regulares para definição da área de referência, mas diferente da abordagem anterior, tem a liberdade de “varrer” a cena, podendo se deslocar do centro original. A sua posição é definida de acordo com o local que maximiza a altura precipitada total em seu interior. As dimensões das áreas de análise também foram as mesmas do centro-fixo.

Por fim, para as elipses, o cômputo de sua forma é feito através da Equação (2), em que os centros das células devem obedecer a seguinte relação (Kim *et al.*, 2019):

$$\frac{(x \cos \theta - y \sin \theta)^2}{r^2} + \frac{(x \sin \theta + y \cos \theta)^2}{\left(\frac{A}{\pi}\right)^2} \leq 1 \quad (2)$$

em que x e y são a ordenada e abscissa do centro da célula em relação ao centro da tormenta (m); θ é o ângulo entre o eixo maior e menor; r é a razão entre eles e A é a área da elipse a ser definida (m²). Os parâmetros r e θ foram definidos a partir da maximização da altura precipitada em seu interior (Kim *et al.*, 2019).

RESULTADOS

Diferenças de estimativas de Fator de Redução de Áreas encontradas

Ao todo, foram identificados 14 eventos distintos com durações entre 1 a 3 horas e cujo tempo de retorno superou o limite inferior estabelecido (10 anos) no período compreendido entre janeiro de

2015 e novembro de 2024. Pela curta duração dos eventos identificados, possivelmente eles seriam oriundos de células convectivas. Pela similaridade em natureza, decidiu-se os agrupar para uma análise comparativa. A Figura (3) apresenta o resultado médio do ARF para este grupo.

Observa-se que as estimativas oriundas da admissão de um centro-fixado baseado em um quadrado foram, em média, 8% inferiores às duas alternativas consideradas. Já a diferença média para essas alternativas foi consideravelmente menor para as áreas avaliadas, da ordem de 3%, sendo a abordagem que considera um centro-móvel aquela que apresentou, sistematicamente, as maiores estimativas. Essas diferenças aumentam à medida que a área de referência se eleva, com a diferença para 225 km² entre centro-fixado e móvel chegando em torno de 9.5% em média e de 7.2% entre centro-fixado e elipse.

De fato, existia a expectativa que o ARF estimado a partir de um centro-móvel apresentasse valores superiores às demais abordagens, em síntese, pois sua posição altera-se a fim de maximizar a chuva em seu interior. Infere-se que a diferença seria maior para áreas que superassem o limite superior empregado (225 km²), em consonância com estudos desenvolvidos para outras regiões (Kim et al., 2008; Biondi et al., 2021). Essa verificação, no entanto, exigiria a extensão espacial da rede pluviométrica do município.

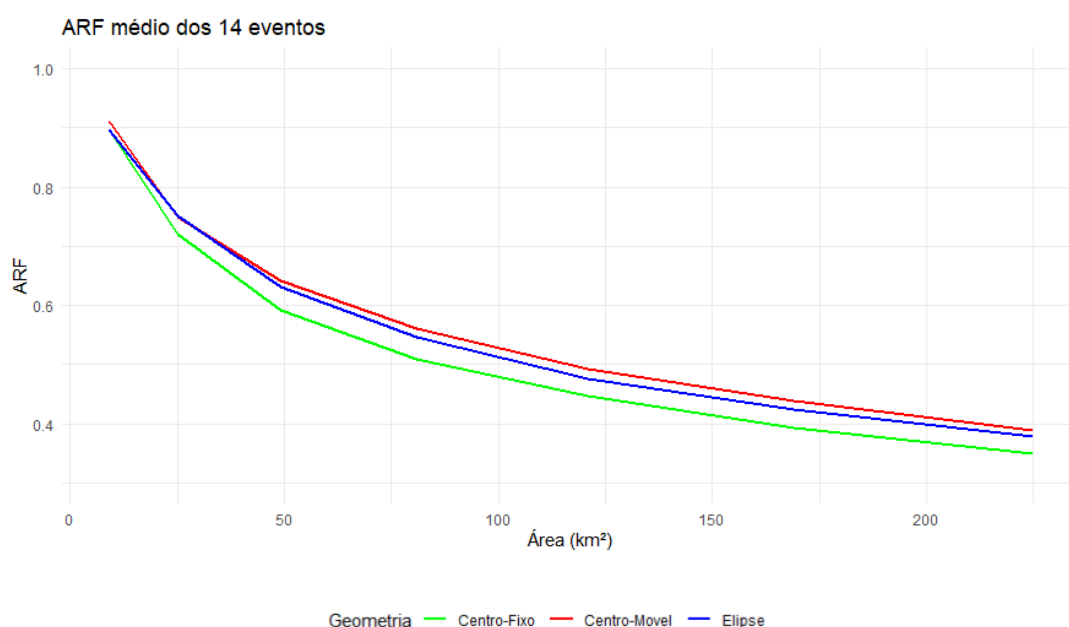


Figura 3 – ARF médio para os 14 eventos analisados, separados por geometria de referência usadas

Possível comportamento indesejado do centro-móvel

Durante a estimativa do ARF a partir da abordagem que admite um centro móvel da tempestade, verificou-se um comportamento que merece ser destacado. Como demonstrado na Figura (4), as áreas de referência para estimativa da precipitação média (sobre essa área) ocorre em uma região expressivamente distinta daquela onde ocorreu o centro da tormenta.

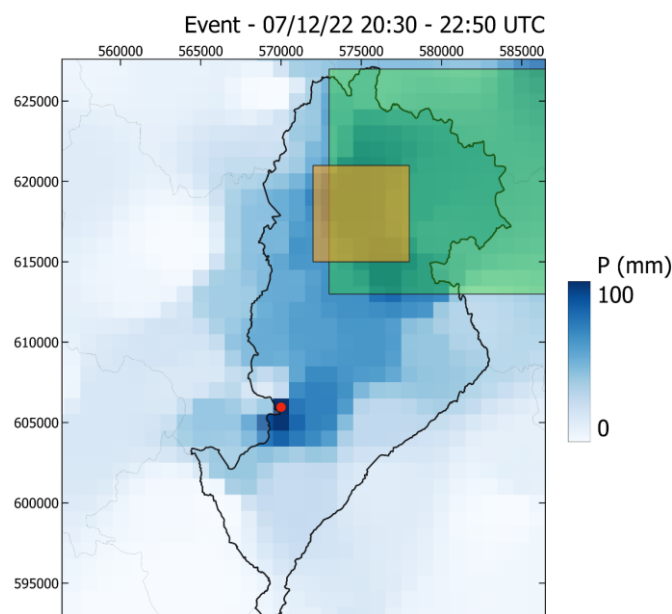


Figura 4 – Posição do centro identificado (ponto vermelho) e áreas de referência de 49 km² (amarelo) e 225 (verde)

O fato das áreas de referência assumirem posições distintas do centro original é parte do comportamento esperado, como Biondi *et al.* (2021) destacam, mas é importante analisar o quão distante elas encontram-se do centro. Para o domínio do estudo atual - em torno de 1.720 km² - assume-se que se trata da mesma formação meteorológica, contudo, para áreas maiores, a possibilidade de se analisar eventos diferentes concomitantes aumenta. Sendo assim, recomenda-se assumir uma distância máxima entre o centro e as áreas de referência como restrição para minimizar essa possibilidade.

CONCLUSÕES

O presente estudo caracterizou a magnitude das diferenças impostas às estimativas de ARF a partir de três (3) diferentes abordagens: assumindo-se um quadrado como área de referência, (i) a de centro-fixa e (ii) a de centro-móvel, e outra em que uma elipse foi considerada como geometria de referência. Foram analisados quatorze (14) eventos oriundos de células convectivas, com alturas de

chuva pontual com tempos de retorno superior a 10 anos, para o município de Belo Horizonte, ocorridos na década definida entre 2015 e 2024. As diferenças médias entre as alternativas e o uso de quadrados com centro-fixa apresentaram uma diferença média de 8%, com a diferença entre o centro-móvel e elipse sendo menor, de 3%. Ademais, problemas relacionados a posição do centro da tormenta foram destacados. Visto que as áreas analisadas foram de até 225 km², recomenda-se que estudos futuros explorem essas diferenças de valor de ARF entre geometrias de referência diferentes para maiores dimensões e considerando uma amostra maior de eventos extremos.

De fato, estudo como o desenvolvido são escassos no Brasil. Apesar de requererem uma rede abrangente, em termos de densidade e cobertura espacial, e com registros históricos com uma cobertura temporal extensa, admite-se que produtos de sensoriamento remoto poderão, em um futuro próximo, contornar essa limitação. Independentemente, o desenvolvimento contínuo de estudos consoantes ao presente é imperativo para o estabelecimento de critérios de projetos de estruturas hidráulicas fundamentadas em condições meteorológicas usualmente observadas no país.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa, e à SUDECAP (Superintendência de Desenvolvimento da Capital) por terem cedido os dados da PBH (Prefeitura de Belo Horizonte) para estudo.

REFERÊNCIAS

- Asquith, W. H., & Famiglietti, J. S. (2000). "*Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach*". *Journal of Hydrology*, 230(1–2), pp. 55–69.
- Biondi, D., Greco, A., & De Luca, D. L. (2021). "*Fixed-area vs storm-centered areal reduction factors: A Mediterranean case study*". *Journal of Hydrology*, 595, 125654.
- Caputo, Ú. K., & Siqueira, R. (2020). "*PRECIPITAÇÕES DE JANEIRO DE 2020 NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE – MG*" in *Anais do XIII Encontro Nacional de Águas Urbanas*, Porto Alegre, Brasil, outubro de 2020, pp. 1-10.
- Kim, J., Lee, J., Kim, D., & Kang, B. (2019). "*The role of rainfall spatial variability in estimating areal reduction factors*". *Journal of Hydrology*, 568, pp. 416–426.
- Martin, A., Fournier, E., & Jalbert, J. (2025). "*Statistical estimation of probable maximum precipitation*". *Hydrology and Earth System Sciences*, 29, pp. 4811-4824.
- Martins, J. R. S., Girnius, L. S., & Pinto, M. G. M. (2014, September). "*POINT TO AREA RAINFALL RELATIONSHIPS USING RADAR DATA*" in *6th Interantional Conference on Flood Management*, São Paulo, Brasil, setembro de 2014, pp. 1-6.

- Olivera, F., Choi, J., Kim, D., & Li, M.-H. (2008). *"Estimation of Average Rainfall Areal Reduction Factors in Texas Using NEXRAD Data"*. Journal of Hydrologic Engineering, 13(6), pp. 438–448.
- Pietersen, J. P. J., Gericke, O. J., & Smithers, J. C. (2023). *"Derivation of long duration geographically-centred areal reduction factors for catchment design rainfall estimation in South Africa"*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 50, pp. 101542.
- Pinheiro, M. M. G., & Naghettini, M. (1998). *"Análise Regional de Frequência e Distribuição Temporal das Tempestades na Região Metropolitana de Belo Horizonte—RMBH"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 3(4), pp. 73–88.
- Rodríguez, R., Navarro, X., Casas, M. C., & Redaño, A. (2013). *"Rainfall spatial organization and areal reduction factors in the metropolitan area of Barcelona (Spain)"*. Theoretical and Applied Climatology, 114(1–2), pp. 1–8.
- Rosin, T., Marra, F., & Morin, E. (2024). *"Exploring patterns in precipitation intensity–duration–area–frequency relationships using weather radar data"*. Hydrology and Earth System Sciences, 28(15), pp. 3549–3566.
- Sivapalan, M., & Blöschl, G. (1998). *"Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves"*. Journal of Hydrology, 204(1–4), pp. 150–167.
- Thorndahl, S., Nielsen, J., & Rasmussen, M. (2019). *"Estimation of Storm-Centred Areal Reduction Factors from Radar Rainfall for Design in Urban Hydrology"*. Water, 11(6), pp. 1120.
- Wright, D. B., Smith, J. A., & Baeck, M. L. (2014). *"Critical Examination of Area Reduction Factors"*. Journal of Hydrologic Engineering, 19, pp. 769–776.