

INFLUÊNCIA DO CLIMA NA GEOMETRIA HIDRÁULICA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DE RIOS NATURAIS

 Hermes Luis Barros Santos ^{1*},  Rodrigo Lilla Manzione ²

¹ Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA), Universidade Federal da Bahia, CEP 40170-290, Salvador, BA, Brasil. *E-mail:* hermes.santos@ufba.br

² Departamento de Geografia e Planejamento, Universidade Estadual Paulista, CEP 19903-302, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* lilla.manzione@unesp.br

*Autor correspondente



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

RESUMO

A geometria hidráulica é uma das principais abordagens empíricas para a compreensão dos ajustes hidráulicos de canais fluviais naturais. Este estudo investiga a influência do clima nos expoentes da geometria hidráulica (b , f e m) a partir da análise comparativa de seções transversais de rios distribuídos em cinco grupos climáticos definidos segundo a classificação de Köppen-Geiger: tropical, seco, temperado, frio e polar. Os dados foram compilados a partir de estudos publicados entre 1953 e 2020 e associados aos respectivos domínios climáticos por meio do cruzamento espacial entre os pontos de coleta e mapas climáticos globais. A análise foi conduzida com base em diagramas triaxial b - f - m , permitindo avaliar os padrões de ajuste hidráulico das seções em relação às subdivisões teóricas associadas às relações largura–profundidade, profundidade–velocidade, número de Froude, área molhada e rugosidade hidráulica. Os resultados indicam que, apesar das marcantes diferenças climáticas entre os grupos analisados, os padrões estruturais médios da geometria hidráulica são amplamente semelhantes. Em todos os domínios climáticos, observou-se predominância de $f > b$ e valores do expoente m concentrados nas subdivisões centrais do diagrama, sugerindo que o clima não atua como um controlador primário da geometria hidráulica. Diferenças entre os grupos climáticos manifestam-se principalmente na dispersão dos expoentes e na ocorrência de valores extremos, especialmente nos climas seco, frio e polar, indicando que o clima exerce influência indireta ao modular a variabilidade dos ajustes hidráulicos, sem alterar os padrões estruturais médios. O estudo contribui para o entendimento da aplicabilidade e das limitações da geometria hidráulica como ferramenta de análise comparativa global, fornecendo subsídios para diagnósticos rápidos de estabilidade hidráulica relativa e para o desenvolvimento de abordagens integradas que incorporem variabilidade hidrológica, conectividade sedimentar e controles geomorfológicos locais.

Palavras-chave: Hidrologia fluvial; Estabilidade de canais; Expoentes hidráulicos; Diagrama triaxial b - f - m ; Classificação climática.

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF CLIMATE ON THE HYDRAULIC GEOMETRY OF NATURAL RIVER CROSS-SECTIONS. Hydraulic geometry is one of the main empirical approaches to understanding the hydraulic adjustments of natural river channels. This study investigates the influence of climate on the exponents of hydraulic geometry (b , f , and m) through the comparative analysis of cross-sections of rivers distributed across five climate groups as defined by the Köppen-Geiger classification: tropical, dry, temperate, cold, and

polar. The data were compiled from studies published between 1953 and 2020 and associated with their respective climate domains through spatial cross-referencing of collection points and global climate maps. The analysis was conducted based on b–f–m triaxial diagrams, allowing the evaluation of the hydraulic adjustment patterns of the sections in relation to the theoretical subdivisions associated with width-depth, depth-velocity relationships, Froude number, wetted area, and hydraulic roughness. The results indicate that, despite the marked climatic differences between the analyzed groups, the average structural patterns of the hydraulic geometry are broadly similar. In all climatic domains, a predominance of $f > b$ and values of the exponent m concentrated in the central subdivisions of the diagram were observed, suggesting that climate does not act as a primary controller of hydraulic geometry. Differences between climate groups are mainly manifested in the dispersion of exponents and the occurrence of extreme values, especially in arid, cold, and polar climates, indicating that climate exerts an indirect influence by modulating the variability of hydraulic adjustments, without altering average structural patterns. This study contributes to the understanding of the applicability and limitations of hydraulic geometry as a tool for global comparative analysis, providing support for rapid diagnoses of relative hydraulic stability and for the development of integrated approaches that incorporate hydrological variability, sedimentary connectivity, and local geomorphological controls.

Keywords: River hydrology; Channel stability; Hydraulic exponents; b-f-m triaxial diagram; Climate classification.

RESUMEN

INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA GEOMETRÍA HIDRÁULICA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS RÍOS NATURALES. La geometría hidráulica es uno de los principales enfoques empíricos para comprender los ajustes hidráulicos de los cauces fluviales naturales. Este estudio investiga la influencia del clima en los exponentes de la geometría hidráulica (b , f y m) mediante el análisis comparativo de secciones transversales de ríos distribuidos en cinco grupos climáticos según la clasificación de Köppen-Geiger: tropical, seco, templado, frío y polar. Los datos se recopilaban a partir de estudios publicados entre 1953 y 2020 y se asociaron con los respectivos dominios climáticos mediante la intersección espacial entre los puntos de recolección y los mapas climáticos globales. El análisis se realizó con base en diagramas triaxiales b–f–m, lo que permitió evaluar los patrones de ajuste hidráulico de las secciones en relación con las subdivisiones teóricas asociadas con las relaciones ancho-profundidad, profundidad-velocidad, número de Froude, área mojada y rugosidad hidráulica. Los resultados indican que, a pesar de las marcadas diferencias climáticas entre los grupos analizados, los patrones estructurales promedio de la geometría hidráulica son, en general, similares. En todos los dominios climáticos, se observó un predominio de $f > b$ y valores del exponente m concentrados en las subdivisiones centrales del diagrama, lo que sugiere que el clima no actúa como un controlador principal de la geometría hidráulica. Las diferencias entre los grupos climáticos se manifiestan principalmente en la dispersión de los exponentes y la ocurrencia de valores extremos, especialmente en climas áridos, fríos y polares, lo que indica que el clima ejerce una influencia indirecta al modular la variabilidad de los ajustes hidráulicos, sin alterar los patrones estructurales promedio. El estudio contribuye a la comprensión de la aplicabilidad y las limitaciones de la geometría hidráulica como herramienta para el análisis comparativo global, proporcionando apoyo para diagnósticos rápidos de la estabilidad hidráulica relativa y para el desarrollo de enfoques integrados que incorporen la variabilidad hidrológica, la conectividad sedimentaria y los controles geomorfológicos locales.

Palabras clave: Hidrología fluvial; Estabilidad de cauces; Exponentes hidráulicos; Diagrama triaxial b–f–m; Clasificación climática.

1 INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos em cursos d'água, quando ocorre em concentrações superiores às condições naturais, pode impactar de forma significativa na dinâmica do escoamento, refletindo-se em alterações na morfologia dos canais e no funcionamento hidrológico das bacias hidrográficas (Schumm & Rea, 1995). Modificações no aporte sedimentar afetam diretamente as características hidrodinâmicas do fluxo, as condições de equilíbrio do canal e os processos erosivos e deposicionais, podendo resultar em mudanças no padrão fluvial e na disponibilidade dos recursos hídricos superficiais, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos (Magalhães Júnior & De Paula Barros, 2020).

Uma abordagem clássica para a análise da resposta hidráulica dos canais fluviais consiste na aplicação da teoria da geometria hidráulica, que permite descrever a variação da largura, profundidade e velocidade do escoamento em função da vazão por meio de funções potenciais simples (Leopold & Maddock, 1953). Essa formulação tem se mostrado útil como uma ferramenta sintética para resumir as interações complexas entre variáveis morfológicas e dinâmicas que atuam nas seções transversais de rios naturais (Rhodes, 1977). Com base nessa teoria, Rhodes (1977) propôs o uso do diagrama triaxial b - f - m , que permite analisar graficamente as relações entre os expoentes das funções potenciais associadas à largura, profundidade e velocidade do escoamento.

A relação entre clima, regime hidrológico e dinâmica sedimentar tem sido amplamente discutida na literatura. Langbein e Schumm (1958) demonstraram que variações na precipitação estão associadas a mudanças na proporção entre descarga líquida e carga sedimentar, evidenciando o papel do clima na produção de escoamento superficial e na disponibilidade de sedimentos. Nesse contexto, seria plausível supor que diferenças climáticas pudessem se refletir em padrões distintos da geometria hidráulica dos canais fluviais.

Entretanto, ao analisar dados de rios distribuídos globalmente, Park (1977) identificou elevada variabilidade nos expoentes da geometria hidráulica, sem evidência de relações sistemáticas com o clima. O autor destacou ainda que grande parte dos estudos disponíveis à época concentrava-se em regiões específicas, como os Estados Unidos e o Reino Unido, apontando a necessidade de ampliar

o escopo de análise para diferentes ambientes climáticos, fisiográficos e geológicos.

Estudos mais recentes reforçam a necessidade de distinguir a influência do clima em diferentes escalas de análise fluvial. Seybold et al. (2017) demonstraram que o clima imprime assinaturas mensuráveis na geometria de redes de drenagem em escala regional e continental, enquanto controles locais tendem a dominar o ajuste hidráulico observado em seções transversais individuais. Chen et al. (2019) demonstram que a aridez se expressa de forma consistente na topografia fluvial e na organização dos perfis longitudinais, no entanto, essas assinaturas emergem em escalas espaciais maiores do que aquelas analisadas pela geometria hidráulica, reforçando a necessidade de distinção entre controles climáticos de escala regional e ajustes hidráulicos locais. Essa distinção é fundamental para a interpretação da geometria hidráulica, uma vez que a ausência de padrões climáticos diretos nos expoentes b , f e m não implica a inexistência de influência climática sobre a organização fluvial em escalas mais amplas.

Desde então, diversos estudos aplicaram a geometria hidráulica para investigar aspectos relacionados à forma, comportamento, estabilidade dos canais e aplicações ambientais. Grison e Kobiyama (2011) realizaram uma revisão abrangente sobre o tema, sintetizando valores médios dos expoentes reportados na literatura. No entanto, a utilização de valores médios globais pode mascarar diferenças associadas a contextos climáticos distintos, especialmente quando um mesmo estudo contempla rios inseridos em múltiplos domínios ambientais. Além disso, avanços recentes na literatura têm fornecido novos conjuntos de dados e interpretações que justificam uma reavaliação crítica dessas relações.

Nesse contexto, o presente estudo parte da premissa de que a análise comparativa dos expoentes da geometria hidráulica, por meio do diagrama b - f - m proposto por Rhodes (1977), pode contribuir para avaliar se existem padrões estruturais ou diferenças sistemáticas associadas aos domínios climáticos, bem como para compreender o papel do clima na variabilidade dos ajustes hidráulicos observados.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar as características hidráulicas de seções transversais de rios naturais distribuídos globalmente, classificados segundo os principais grupos climáticos da classificação de Köppen-Geiger, a fim de investigar em que medida o clima influencia os padrões

estruturais e a variabilidade da geometria hidráulica. O estudo se justifica diante do atual contexto de mudanças nos padrões do ciclo hidrológico em escalas local, regional e global, que tende a intensificar a variabilidade do escoamento e dos processos sedimentares, tornando fundamental o aprimoramento de ferramentas conceituais capazes de distinguir entre ajustes estruturais médios e respostas hidrodinâmicas episódicas dos canais fluviais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado a partir de um levantamento de dados bibliográficos, seguido pela classificação climática das áreas de estudo e, por fim, pela análise comparativa da geometria hidráulica.

2.1 Levantamento e compilação dos dados

Para investigar a influência do clima na geometria hidráulica, foi realizada uma compilação de dados de expoentes (b, f, m) a partir de trabalhos previamente publicados. A busca baseou-se inicialmente na extensa revisão realizada por Grison e Kobiyama (2011), que reúne publicações seminais e de grande relevância sobre o tema. Para complementar esta base de dados histórica e incluir pesquisas mais recentes, realizou-se uma busca adicional por artigos publicados nos últimos cinco anos.

A associação entre os expoentes da geometria hidráulica (b, f e m) e os grupos climáticos foi realizada por meio do cruzamento espacial entre a localização das seções fluviais analisadas nos estudos compilados e a classificação climática global de Köppen–Geiger.

Inicialmente, para cada estudo incluído na base de dados, foi identificada a localização geográfica da seção transversal ou estação fluviométrica utilizada no cálculo da geometria hidráulica. Quando explicitadas nos trabalhos originais, foram utilizadas as coordenadas geográficas fornecidas pelos autores. Nos casos em que as coordenadas não estavam diretamente disponíveis, a localização da seção foi inferida a partir da descrição do rio, da estação hidrométrica ou do trecho analisado, utilizando mapas, bases cartográficas e informações auxiliares apresentadas nos próprios estudos.

As coordenadas geográficas obtidas para cada seção foram então sobrepostas aos mapas globais de classificação climática de Köppen–Geiger, utilizando o *software* gratuito QGIS, permitindo a identificação do tipo climático dominante no ponto de coleta dos dados hidráulicos. A partir dessa

correspondência espacial, cada seção fluvial foi atribuída a um dos cinco grandes grupos climáticos adotados neste estudo, tomando como base a projeção climática para a série histórica de 1980-2016, conforme proposto por Beck et al. (2018): tropical, seco, temperado, frio e polar. Ao todo, este trabalho reuniu dados de publicações ao redor do mundo, contemplando 131 seções de rios naturais em países como os Estados Unidos da América, China, Brasil, Nigéria, Turquia, Canadá e Inglaterra.

Esse procedimento assume que a geometria hidráulica observada em uma seção transversal reflete, de forma integrada, as condições hidrológicas e sedimentológicas impostas pelo clima predominante na área de drenagem a montante, reconhecendo-se que fatores locais como a geologia, uso do solo, cobertura vegetal e intervenções antrópicas, podem modular essa influência climática. Ainda assim, a utilização da classificação de Köppen–Geiger fornece um critério padronizado de escala regional e global, permitindo a comparação consistente dos expoentes b, f e m entre diferentes contextos climáticos.

2.2 Teoria da geometria hidráulica

De acordo com Leopold e Maddock (1953) as variáveis hidráulicas da largura, profundidade e velocidade são grandezas que sofrem influência da variação da vazão em uma seção transversal, a Figura 1, adaptada de United States Geological Survey (USGS, 2023), apresenta a seguir uma imagem didática de uma seção transversal.

Uma vez que as variáveis da largura, profundidade e velocidade da seção transversal são diretamente influenciadas pela variação da vazão, as mesmas

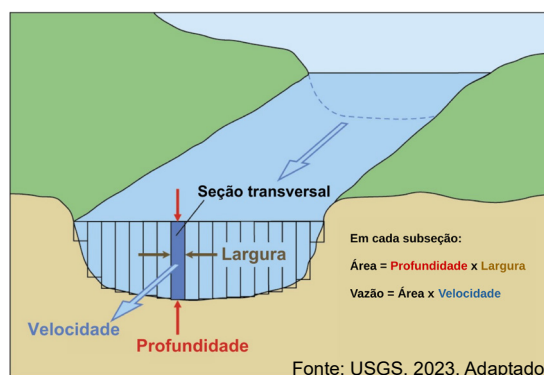


FIGURA 1 – Seção transversal de um canal natural.

FIGURE 1 – Cross section of a natural channel.

podem ser expressas como funções potenciais simples como apresentado nas Equações (1), (2) e (3):

$$w = a \cdot Q^b \quad (1)$$

$$d = c \cdot Q^f \quad (2)$$

$$v = k \cdot Q^m \quad (3)$$

Onde:

- Q = Vazão líquida (L^3/T);
- w = Largura (L);
- d = Profundidade (L)
- v = Velocidade (L/T)
- a, c, k = Coeficientes da geometria hidráulica; e
- b, f, m = Expoentes da geometria hidráulica.

Através da equação da continuidade podemos reescrever as equações (1), (2) e (3), da seguinte forma:

$$Q = w \cdot d \cdot v \quad (4), \text{ ou seja:}$$

$$Q = a \cdot c \cdot k \cdot Q^{(b+f+m)} \quad (5)$$

Então para a Equação (5) podemos dizer que:

$$b + f + m = 1 \quad (6); \text{ e}$$

$$a \cdot c \cdot k = 1 \quad (7)$$

2.3 Análise dos expoentes da geometria hidráulica utilizando o diagrama B-F-M

Rhodes (1977) propôs a utilização do diagrama triaxial para interpretação dos expoentes da geometria hidráulica, de uma seção transversal de um canal natural, em dez setores representando tipos de canais quanto as relações largura-profundidade, velocidade-área, inclinação-rugosidade, número de Froude e competência para o transporte de sedimentos, sendo separado por 5 linhas com base em considerações hidráulicas e morfológicas. A Figura 2 apresenta a

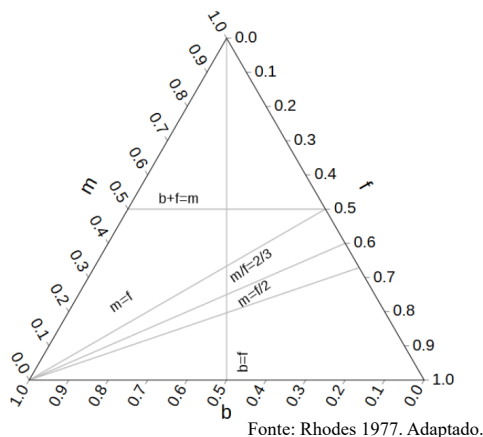


FIGURA 2 – Diagrama triaxial (b-f-m).

FIGURE 2 – Triaxial diagram (b-f-m).

seguir o diagrama triaxial (b-f-m), nele são plotados pontos que utilizam os valores dos expoentes da largura (w), profundidade (d) e velocidade (v) da geometria hidráulica, relacionando-os a um comportamento hidráulico e de estabilidade do canal.

O diagrama triaxial apresentado na Figura 2 representa as taxas de mudança dos expoentes b, f, e m. O conceito das subdivisões, representadas pelas 5 linhas que cortam a figura, é apresentado a seguir, conforme proposto por Rhodes (1977).

a. Subdivisão 1 (b=f): Está relacionado a taxa de mudança da relação largura-profundidade com o aumento da vazão. Quando a condição $b > f$ é verdadeira, indica que o canal se torna mais amplo e mais raso com o aumento da vazão, portanto, são mais capazes de transportar material de fundo. Em contrapartida, a condição $b < f$ indica que a profundidade aumenta de forma mais rápida do que a largura. Nesses casos o canal se torna mais estreito e profundo e, portanto, são mais capazes no transporte de sedimentos suspensos;

b. Subdivisão 2 (m=f): Está relacionado com a taxa de mudança da relação profundidade-velocidade. Canais em que $m < f$ possuem menor competência para o transporte de sedimentos enquanto $m \geq f$ possuem maior competência

c. Subdivisão 3 (m=f/2): Está relacionado ao número de Froude que diferencia condições de fluxo supercríticas e subcríticas. Se $m > f/2$, o número de Froude aumenta com o aumento da vazão, os pontos nesta condição são plotados acima da linha. Se $f/2 > m$ o número de Froude diminui com o aumento da vazão, e isso significa que o canal pode ser incapaz de transportar certos tipos de sedimentos, os pontos nesta condição são plotados abaixo da linha;

d. Subdivisão 4 (m=b+f): Está relacionado com a taxa da mudança da relação velocidade-área. Os pontos plotados acima desta linha indicam canais em que a velocidade está aumentando mais rapidamente do que a área molhada da seção transversal, ou seja, $m > b+f$, esse tipo de canal foi classificado como estável pois o leito e as margens não estão sujeitos a erosão significativa. O inverso ocorre quando $m < b+f$; e

e. Subdivisão 5 (m/f=2/3): Está relacionado com o coeficiente de rugosidade de Manning. Se $m < (2/3)f$ a relação declividade-rugosidade diminui enquanto em $m > (2/3)f$ esta relação aumenta. Rhodes (1977) destaca que a declividade apresenta pouca mudança em relação a variação de vazão, e, portanto, assume-

-se que a rugosidade é o fator que sofre maior alteração.

2.4 Distribuição climática de Köppen-Geiger

O sistema de classificação climática Köppen-Geiger é amplamente conhecido e divide o nosso planeta em 5 classes climáticas principais que de acordo com Cui et al. (2021) são:

- *Grupo A:* O grupo climático A contempla as zonas de clima tropical e se dividem nos tipos equatorial (f), de monção (m) e de savana (w ou s). Neste grupo foram reunidos dados dos expoentes da geometria hidráulica em rios no Brasil e na Nigéria onde, o tipo climático predominante para ambos foi identificado como tropical de savana (Aw);

- *Grupo B:* O grupo climático B abrange as zonas de clima seco, dividindo-se entre os tipos árido (W) e semiárido (S) e subtipos quente (h) e frio (k). Neste grupo os dados prospectados contemplam trabalhos realizados em rios nos Estados Unidos da América, onde foram identificados dois tipos climáticos predominantes, sendo estes o clima árido quente (BWh) e o clima semiárido quente (BSH), bem como na China onde o tipo climático predominante foi o clima semiárido frio (BSk);

- *Grupo C:* O grupo climático C abrange as zonas classificadas como de clima temperado, dividindo-se entre os tipos que não possuem uma estação seca (f), possuem inverno seco (w) ou verão seco (s), e ainda pelos subtipos entre verões quentes (a), frescos (b) e frios (c). Este foi o grupo climático mais diversificado pois abrange dados de rios nos Estados Unidos da América, Canadá, Inglaterra, Brasil e Turquia, onde foram identificados os tipos climáticos predominantes de clima mediterrânico de verão quente (Csa) e fresco (Csb), clima subtropical úmido (Cfa) e oceânico temperado (Cfb);

- *Grupo D:* O grupo climático D abrange as zonas classificadas como de clima frio (continental e subártico), dividindo-se entre os tipos que não possuem uma estação seca (f), possuem inverno seco (w) ou verão seco (s), e ainda pelos subtipos entre verões quentes (a), frescos (b), frios (c) e muito frios (d). Este foi o grupo climático menos diversificado pois possui apenas dados de trechos em rios localizados nos Estados Unidos da América, onde os tipos climáticos predominantes foram o clima continental úmido de verão quente (Dfa) e de verão fresco (Dfb); e

- *Grupo E:* O grupo climático E abrange as zonas classificadas como de clima polar, dividindo-se entre os tipos climáticos de tundra (T) e glacial (F). Este grupo climático possui dados de trechos de canais naturais dos Estados Unidos da América e da China, entretanto, não há uma boa distribuição dos dados, concentrando-se de forma majoritária em trechos localizados na China.

Beck et al. (2018) desenvolveu um mapa global para classificação de Köppen-Geiger entre os anos de 1980 e 2016, extrapolando também um cenário futuro entre 2071 e 2100. O mapeamento do cenário climático atual desenvolvido pelos autores foi derivado de um conjunto de dados climáticos que levaram em consideração a temperatura do ar e a precipitação e são apresentados a seguir na Figura 3.

3 RESULTADOS

A análise dos diagramas b–f–m para os diferentes grupos climáticos revelou padrões consistentes de posicionamento dos expoentes da geometria hidráulica em relação às subdivisões propostas por Rhodes (1977). Em todos os grupos analisados, observou-se que os pontos não se distribuem aleatoriamente no espaço triaxial, concentrando-se preferencialmente em regiões específicas do diagrama, o que permite a identificação de tendências comuns de ajuste hidráulico das seções fluviais.

De modo geral, os diagramas indicam elevada similaridade entre os grupos climáticos no que se refere às relações entre largura, profundidade e velocidade, sendo as diferenças observadas predominantemente associadas à dispersão dos pontos, e não a mudanças sistemáticas no posicionamento relativo em relação às subdivisões teóricas.

3.1 Grupo A – Tropical

Os valores dos expoentes b, f e m para o grupo climático tropical (Quadro 1) e sua distribuição no diagrama b–f–m (Figura 4) indicam predominância de pontos posicionados à direita da subdivisão b=f, evidenciando que, na maior parte das seções analisadas, a profundidade responde de forma mais sensível à variação de vazão do que a largura. Esse comportamento foi observado na maioria dos trechos analisados, refletindo um padrão consistente de ajuste largura–profundidade dentro desse grupo.

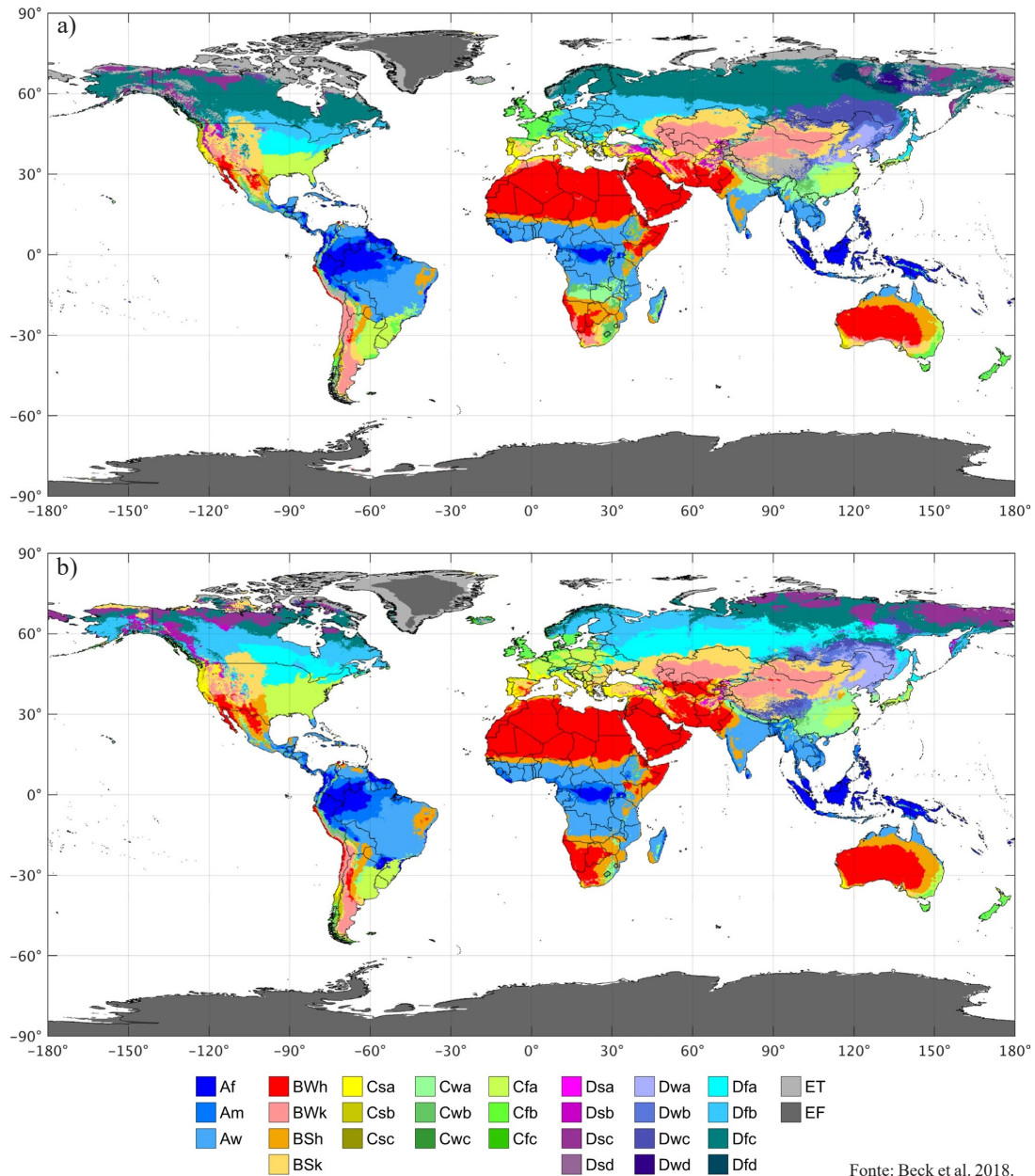


FIGURA 3 – Mapa da classificação climática de Köppen-Geiger para a série histórica de 1980-2016, em a), e em b), para a série entre 2071-2100.

FIGURE 3 – Map of the Köppen-Geiger climate classification for the historical series 1980-2016, in a), and in b), for the series between 2071-2100.

O diagrama deste grupo climático (Figura 4), apresenta também pontos que concentram-se predominantemente sobre ou abaixo à subdivisão $m=f$, indicando que a resposta da velocidade é proporcional ou inferior à resposta da profundidade. A distribuição em torno da subdivisão $m=f/2$ mostra que a maior parte das seções se encontra próxima ou abaixo dessa

linha, sugerindo predominância de condições de escoamento subcríticas ao longo da faixa de vazões analisada.

Os dados do grupo tropical também se concentram majoritariamente abaixo da subdivisão $m=b+f$, indicando que o aumento da área molhada ocorre de forma mais rápida do que o aumento da velocidade. Em relação à

QUADRO 1 – Valores dos expoentes da geometria hidráulica de seções naturais em rios dentro do grupo climático A.

TABLE 1 – Values of hydraulic geometry exponents of natural river sections within climatic group A.

Autor / Localização	Rio/Estação	b	f	m	Tipo
Adeyemi et al. (2020) Nigéria	Rio Oke-Ogun	0,19	0,57	0,25	Aw
	Rio Igbooburo	0,51	0,44	0,04	
	Rio Awon	-0,12	0,67	0,46	
	Rio Onikoko	0,02	0,62	0,36	
	Rio Odo-Oba	0,11	0,59	0,30	
	Rio Ayin	0,46	0,44	0,10	
Aquino et al. (2005) Brasil	Rio Araguaia/Barra do Graças	0,04	0,66	0,29	Aw
	Rio Araguaia/Aruanã	0,05	0,43	0,52	
	Rio Araguaia/Bandeirantes	0,04	0,63	0,33	
	Rio Araguaia/Luis Alves	0,05	0,65	0,30	
	Rio Araguaia/São Félix do Araguaia	0,04	0,44	0,52	
	Rio Araguaia/Conceição do Araguaia	0,03	0,60	0,37	
	Rio Araguaia/Xambioá	0,02	0,25	0,73	
	Rio Araguaia/Araguatins	0,02	0,33	0,65	
Valor médio do Grupo A		0,10	0,52	0,37	

Fonte: Elaboração própria, 2025.

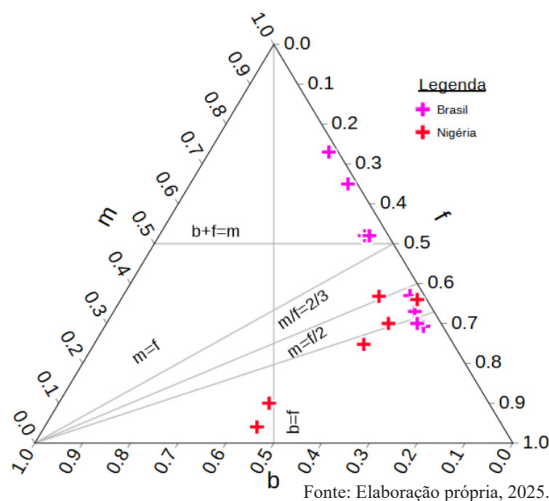


FIGURA 4 – Diagrama b-f-m para Grupo climático A (tropical).

FIGURE 4 – b-f-m diagram for Climate Group A (tropical).

subdivisão $m/f=2/3$, observa-se concentração de pontos próximos ou abaixo da linha, sugerindo que ajustes associados à variação da rugosidade hidráulica exercem papel relevante nas respostas observadas.

3.2 Grupo B – Seco

No grupo climático seco (Quadro 2; Figura 5), os expoentes b e f também apresentam predominância de $f>b$, embora com maior

QUADRO 2 – Valores dos expoentes da geometria hidráulica de seções naturais em rios dentro do grupo climático B.

TABLE 2 – Values of hydraulic geometry exponents of natural river sections within climatic group B.

Autor/ Localização	Rio/Estação	b	f	m	Tipo
Leopold e Maddock (1953) Estados Unidos da América	Rio Virgin em Virgin, Utah	0,26	0,29	0,45	BWk
	Rio Grande em San Acacia, N. Mex.	0,59	0,13	0,28	BSH
	Rio Grande em San Felipe, N. Mex.	0,22	0,48	0,3	
	Rio Puerco em Rio Puerco, N. Mex.	0,43	0,16	0,41	
	Rio Grande próximo a Bernalillo, N. Mex.	0,03	0,46	0,51	
Ran et al. (2012) China	Rio Amarelo/Jimai	0,29	0,30	0,41	BSk
	Rio Amarelo/Maqu	0,06	0,50	0,44	
	Rio Amarelo/Tangnaihai	0,08	0,51	0,41	
	Rio Amarelo/Guijie	0,16	0,36	0,48	
	Rio Amarelo/Xunhua	0,17	0,43	0,40	
	Rio Amarelo/Qingtongxia	0,12	0,35	0,53	
	Rio Amarelo/Dengkou	0,18	0,23	0,59	
	Rio Amarelo/Bayangaole	0,22	0,39	0,39	
	Rio Amarelo/Sanhuhekou	0,18	0,26	0,56	
Valor médio do Grupo B		0,21	0,34	0,45	

Fonte: Elaboração própria, 2025.

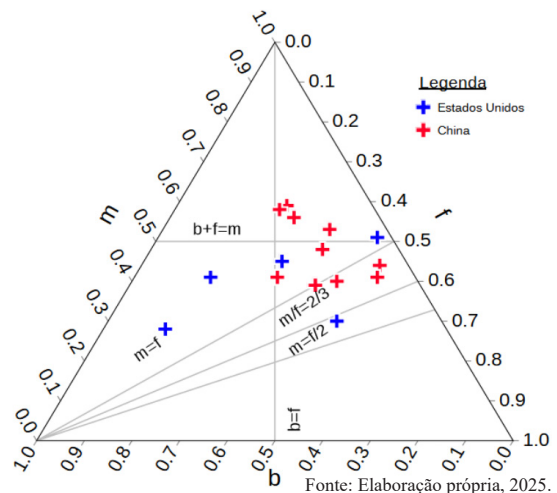


FIGURA 5 – Diagrama b-f-m para Grupo climático B (seco).

FIGURE 5 – b-f-m diagram for Climate Group B (dry).

dispersão quando comparados ao grupo tropical. Essa maior variabilidade indica diversidade nos ajustes largura–profundidade das seções analisadas, ainda que o padrão geral se mantenha consistente.

A distribuição dos pontos (Figura 5) em relação à subdivisão $m=f$ evidencia ampla variabilidade do expoente m , com valores posicionados tanto próximos quanto acima e abaixo dessa linha. Esse comportamento indica maior diversidade na resposta da velocidade à variação de vazão, refletindo heterogeneidade hidráulica mais pronunciada dentro desse grupo.

Na subdivisão $m = f/2$, observa-se presença de pontos tanto acima quanto abaixo da linha, sugerindo maior variabilidade do número de Froude em comparação ao grupo tropical. Apesar disso, não se observa predomínio sistemático de condições associadas a aumento contínuo do número de Froude.

Em relação às subdivisões $m=b+f$ e $m/f = 2/3$, a maioria dos pontos permanece abaixo das respectivas linhas, indicando que, mesmo com maior dispersão, os ajustes hidráulicos predominantes continuam associados à expansão da área molhada e à modulação por variações de rugosidade.

3.3 Grupo C – Temperado

O grupo climático temperado (Quadro 3; Figura 6) apresenta distribuição mais concentrada dos expoentes no diagrama $b-f-m$. A maioria dos pontos posiciona-se à direita da subdivisão $b = f$, com menor dispersão dos valores de b e f em comparação aos grupos tropical e árido.

Os valores do expoente (Figura 6) m concentram-se predominantemente abaixo da subdivisão $m=f$ e próximos à subdivisão $m = f/2$, indicando resposta subproporcional da velocidade em relação à profundidade. Esse padrão sugere comportamento hidráulico relativamente uniforme ao longo das seções analisadas.

Nas subdivisões $m=b+f$ e $m/f=2/3$, observa-se concentração dos pontos abaixo das linhas teóricas, indicando que os ajustes hidráulicos nesse grupo são caracterizados por crescimento da área molhada superior ao aumento da velocidade e por mecanismos de ajuste associados à rugosidade hidráulica, com baixa dispersão relativa.

QUADRO 3 – Valores dos expoentes da geometria hidráulica de seções naturais em rios dentro do grupo climático C.

TABLE 3 – Values of hydraulic geometry exponents of natural river sections within climatic group C.

<i>Autor/ Localização</i>	<i>Rio/Estação</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>m</i>	<i>Tipo</i>
Stall e Yang (1970) Estados Unidos da América	Rio Tuolumne, acima de LaGrange, California.	0,30	0,34	0,36	Csa
	Rio Rogue, acima de Central Point, Oregon	0,13	0,34	0,53	Csb
	Rio Roanoke, acima de Roanoke Rapids, N.C	0,12	0,47	0,41	Cfa
	Rio Neches, acima de Evadale, Tx.	0,35	0,47	0,18	
	Rio de Skagit, acima de Mt. Vernon, Wa.	0,13	0,35	0,52	Cfb
Ponton (1972) Canadá	Rio Green	0,60	0,40	-0,01	
	Rio Birkeenhead	0,79	0,44	-0,23	
Knighton (1972) Inglaterra	Rio Dean, em Cheshire	0,29	0,40	0,31	
Pereira et al. (2014) Brasil	Rio Ijuí/Passo Faxinal	0,20	0,41	0,39	Cfa
	Rio Ijuí/Nova Potiribu	0,18	0,20	0,62	
	Rio Ijuí/Nova Potiribu Jusante	0,11	0,31	0,59	
	Rio Ijuí/Conceição	0,12	0,47	0,42	
	Rio Ijuí/Ponte Nova Conceição	0,02	0,27	0,70	
	Rio Ijuí/Santo Angelo	0,02	0,31	0,60	
	Rio Ijuí/Colônia Mousquer	0,13	0,38	0,49	
	Rio Ijuí/Ponte Mistica	0,24	0,20	0,56	
Grisson et al. (2014) Brasil	Rio dos Bugres/RB01	0,04	0,26	0,69	
	Rio dos Bugres/RB02	0,02	0,53	0,45	
	Rio dos Bugres/RB03	0,10	0,47	0,43	
	Rio dos Bugres/RB04	0,11	0,49	0,40	
	Rio dos Bugres/RB05	0,05	0,34	0,61	
	Rio dos Bugres/RB06	0,06	0,71	0,23	
	Rio dos Bugres/RB07	0,07	0,22	0,71	
	Rio dos Bugres/RB08	0,03	0,14	0,83	
	Rio dos Bugres/RB09	0,06	0,44	0,50	
	Rio dos Bugres/RB10	0,12	0,47	0,41	
	Rio dos Bugres/RB11	0,10	0,35	0,55	
Yuce e Karatas (2019) Turquia	Rio Ceyhan/E20A004	0,01	0,03	0,10	Csb
	Rio Ceyhan/E20A006	0,14	0,08	0,78	
	Rio Ceyhan/E20A007	0,01	0,23	0,76	
	Rio Ceyhan/E20A008	0,55	0,42	0,04	
	Rio Ceyhan/E20A020	0,24	-0,29	1,05	
	Rio Ceyhan/E20A022	0,09	-0,09	1,00	
	Rio Ceyhan/E20A025	0,13	0,09	0,78	
<i>Valor médio do Grupo C</i>		<i>0,17</i>	<i>0,31</i>	<i>0,49</i>	

Fonte: Elaboração própria, 2025.

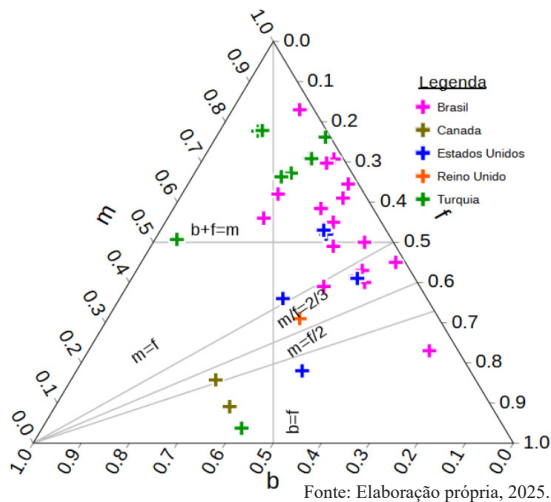


FIGURA 6 – Diagrama b-f-m para Grupo climático C (temperado).

FIGURE 6 – b-f-m diagram for Climate Group C (Temperate).

3.4 Grupo D – Frio (Continental e Subártico)

Os resultados do grupo climático frio (Quadro 4; Figura 7) evidenciam maior dispersão dos expoentes b , f e m no diagrama b - f - m . Ainda assim, mantém-se a predominância de pontos à direita da subdivisão $b=f$, indicando $f > b$ para a maioria das seções analisadas.

A distribuição do expoente m em relação às subdivisões $m=f$ e $m=f/2$ (Figura 7) apresenta ampla variabilidade, com pontos posicionados acima e abaixo dessas linhas. Esse comportamento indica diversidade de respostas da velocidade à variação de vazão dentro desse grupo, refletindo ajustes hidráulicos contrastantes entre as seções analisadas.

Em relação às subdivisões $m=b+f$ e $m/f = 2/3$, os pontos mostram distribuição mais dispersa do que nos grupos tropical e temperado, embora a maior parte ainda se concentre abaixo das linhas teóricas, sugerindo predominância de ajustes associados à expansão da área molhada e à variação da rugosidade.

3.5 Grupo E – Polar

O grupo climático polar (Quadro 5; Figura 8) apresenta o menor número de observações, porém com elevada dispersão dos pontos no diagrama b - f - m . A maioria das seções posiciona-se à direita da subdivisão $b=f$, mantendo o padrão observado nos demais grupos climáticos.

Os valores do expoente m distribuem-se principalmente próximos às subdivisões $m=f$ e $m=f/2$ (Figura 8), indicando respostas proporcionais

QUADRO 4 – Valores dos expoentes da geometria hidráulica de seções naturais em rios dentro do grupo climático D.

TABLE 4 – Values of hydraulic geometry exponents of natural river sections within climatic group D.

Autor/ Localização	Rio/Estação	b	f	m	Tipo
Leopold e Maddock (1953) Estados Unidos da América	Rio Smoky Hill próximo a Ellis, Kans.	0,36	0,48	0,16	Dfa
	Rio Saline, próximo a Russell, Kans	0,37	0,38	0,25	
	Rio Smoky Hill, em Ellsworth, Kans	0,14	0,6	0,26	
	Rio Republican, próximo a Bloomington, Nebr.	0,5	0,06	0,44	
	Grand River at Shadehill, S. Dak	0,25	0,36	0,39	
	Rio Middle Loup, em St. Paul, Nebr.	0,32	0,31	0,37	
	Rio Middle Loup, em Arcadia, Nebr.	0,13	0,52	0,35	
	Rio Powder, em Arvada, Wyo	0,1	0,59	0,31	Dfb
	Rio Moreau, próximo a Faith, Dak.	0,1	0,56	0,34	
	Rio White, próximo a Oglala, Dak.	0,3	0,63	0,07	
	Rio Belle Fourche, abaixo de Moorcroft, Wyo	0,31	0,44	0,25	
	Bighorn River at Kane, Wyo	0,66	0,51	0,43	
	Rio Bighorn, em Thermopolis, Wyo	0,14	0,31	0,55	
	Rio Bighorn River, em Manderson, Wyo	0,22	0,5	0,28	
	Rio Cheyenne, próximo a Hot Springs, S. Dak.	0,5	0,25	0,25	
Wolman (1955) Estados Unidos da América	Rio Brandywine, Pennsylvania	0,04	0,41	0,55	Dfa
Leopold e Skibitzke (1967) Estados Unidos da América	Rio Middlefork Salmon próximo a Cape Horn	0,16	0,52	0,30	Dfb
	Riacho Bear Valley próximo a Cape Horn	0,06	0,51	0,43	
	Rio Middlefork Salmon próximo a Meyers Cave	0,04	0,61	0,36	
	Riacho Big próximo a Big Creek	0,08	0,52	0,41	
	Rio Salmon em Salmon	0,27	0,53	0,20	
	Rio Salmon em Challis	0,10	0,49	0,40	
Stall e Yang (1970) Estados Unidos da América	Rio Big Sandy acima de Louisa, Ky.	0,23	0,41	0,36	Dfa
	Rio White acima de Spencer, Indiana.	0,29	0,36	0,35	
	Rio Sangamon racima de Oakford, IL.	0,28	0,49	0,23	
	Rio Merrimack acima de Merrimack, N. H.	0,20	0,35	0,45	Dfb
	Rio Susquehanna River acima de Waverly, N. Y.	0,23	0,37	0,40	
	Rio Colorado acima de Glenwood Springs, Colorado.	0,19	0,36	0,45	
	Rio Snake acima de Heise, Idaho	0,11	0,41	0,48	
Valor médio do Grupo D		0,23	0,44	0,35	

Fonte: Elaboração própria, 2025.

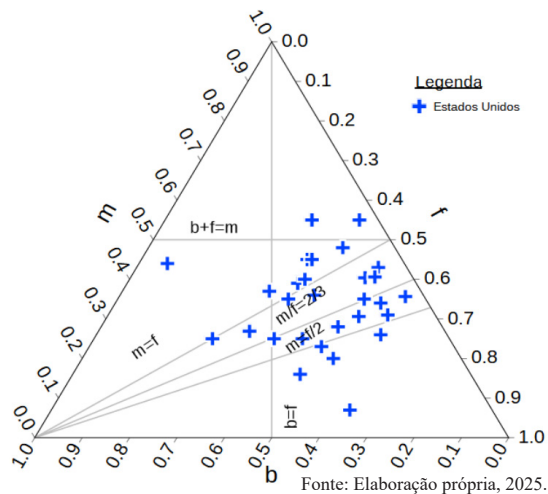


FIGURA 7 – Diagrama b-f-m para Grupo climático D (frio).

FIGURE 7 – b-f-m diagram for Climate Group D (cold).

ou subproporcionais da velocidade em relação à profundidade. As subdivisões $m=b+f$ e $m/f=2/3$ também apresentam predominância de pontos abaixo das linhas, embora com maior variabilidade, refletindo diversidade nos mecanismos de ajuste hidráulico.

3.6 Padrões gerais observados no diagrama B-F-M

A análise conjunta dos resultados evidencia que, apesar das diferenças climáticas entre os grupos analisados, os padrões estruturais da geometria hidráulica são amplamente semelhantes. Em todos os grupos climáticos, observa-se predominância de $f>b$, indicando resposta mais sensível da profundidade em relação à largura, bem como valores de m concentrados nas proximidades das subdivisões $m=f$ e $m=f/2$.

As principais diferenças entre os grupos manifestam-se na dispersão dos expoentes e na frequência relativa dos pontos em determinadas subdivisões, particularmente nos grupos árido, frio e polar, que apresentam maior variabilidade e ocorrência de valores extremos. Essas diferenças refletem variações nos ajustes hidráulicos internos a cada grupo, sem, contudo, alterar o padrão estrutural geral observado no diagrama $b-f-m$.

Esses resultados indicam que o clima não atua como controlador primário da geometria hidráulica, mas pode influenciar a variabilidade dos ajustes hidráulicos observados, fornecendo a base empírica para a discussão apresentada na seção seguinte.

QUADRO 5 – Valores dos expoentes da geometria hidráulica de seções naturais em rios dentro do grupo climático E.

TABLE 5 – Values of hydraulic geometry exponents of natural river sections within climatic group E.

Autor/ Localização	Rio/Estação	b	f	m	Tipo
Phillips e Harlin (1984) Estados Unidos da América	Rio Huerfano, Colorado	0,37	0,05	0,58	ET
Qin et al. (2020) China	Flui para o rio Tongtian/TUTH	0,43	0,39	0,18	
	Flui para o rio Jinsha/TOTH	0,10	0,57	0,34	
	Flui para o exutório/JSJ1	0,07	0,21	0,72	
	Flui para o exutório/JSJ2	0,15	0,33	0,53	
	Flui para o exutório/JSJ3	0,15	0,27	0,58	
	Flui para o exutório/JSJ4	0,03	0,44	0,53	
	Flui para o exutório/JSJ5	0,09	0,31	0,60	
	Flui para o exutório/JSJ6	0,09	0,22	0,69	
	Flui para o exutório/JSJ7	0,06	0,45	0,49	
	Flui para o exutório/JSJ8	0,12	0,42	0,47	
	Flui para o exutório/JSJ9	0,11	0,56	0,33	
	Flui para o rio Jinsha/BTH	0,10	0,50	0,40	
	Flui para o rio Jinsha/SMH	0,13	0,39	0,48	
	Flui para o rio Jinsha/JJH	0,07	0,51	0,42	
	Flui para o rio Jinsha/LPH	0,09	0,41	0,51	
	Flui para o rio Jinsha/CJH	0,07	0,46	0,47	
	Flui para o rio Jinsha/SDGH	0,04	0,51	0,48	
	Flui para o rio Jinsha/YGJ1	0,11	0,45	0,45	
	Flui para o rio Jinsha/YGJ2	0,03	0,23	0,74	
	Flui para o rio Jinsha/LLH	0,25	0,52	0,50	
	Flui para o rio Jinsha/SYH	0,18	0,23	0,56	
	Flui para o rio Jinsha/PJ	0,37	0,33	0,31	
	Flui para o rio Jinsha/MGH	0,21	0,30	0,49	
	Flui para o rio Jinsha/WMH	0,28	0,31	0,41	
	Flui para o rio Jinsha/XZH	0,15	0,51	0,33	
	Flui para o rio Jinsha/YLJ1	0,23	0,29	0,48	
	Flui para o rio Jinsha/YLJ2	0,19	0,49	0,34	
	Flui para o rio Jinsha/YLJ3	0,09	0,30	0,61	
	Flui para o rio Jinsha/YLJ4	0,12	0,38	0,51	
	Flui para o rio Yalong/XSH	0,06	0,35	0,60	
	Flui para o rio Xianshui/NQH	0,04	0,33	0,63	
	Flui para o rio Yalong/LTH1	0,28	0,38	0,34	
	Flui para o rio Yalong/LTH2	0,12	0,41	0,50	
	Flui para o rio Yalong/XJH	0,21	0,27	0,53	
	Flui para o rio Qiansuo/NLH	0,16	0,32	0,52	
	Flui para o rio Yalong/JLH	0,10	0,43	0,47	
	Flui para o rio Yalong/ANH	0,11	0,14	0,73	
	Flui para o rio Anning/SSH	0,23	0,40	0,37	
Valor médio do Grupo E		0,15	0,37	0,49	

Fonte: Elaboração própria, 2025.

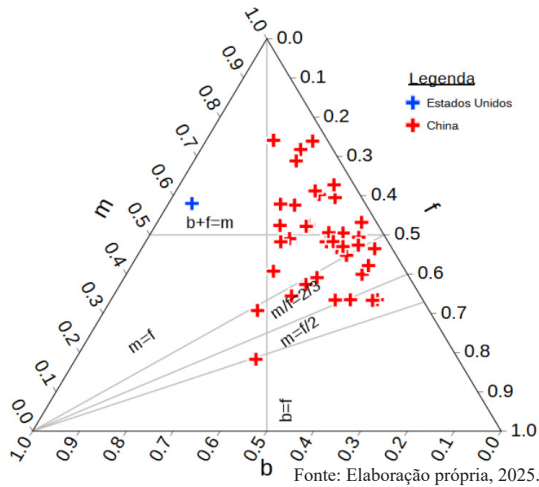


FIGURA 8 – Diagrama b-f-m para Grupo climático E (polar).

FIGURE 8 – b-f-m diagram for Climate Group E (polar).

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo indicam que os padrões estruturais da geometria hidráulica são amplamente semelhantes entre os diferentes domínios climáticos analisados. A predominância de $f > b$, bem como a concentração dos valores do expoente m nas proximidades das subdivisões $m=f$ e $m=f/2$, foi observada em todos os grupos climáticos, sugerindo que os mecanismos fundamentais de ajuste hidráulico das seções fluviais operam de forma consistente, independentemente do clima.

Essa invariância estrutural corrobora as conclusões clássicas de Park (1977), que não identificou relação sistemática entre os expoentes da geometria hidráulica e o clima em escala global. O presente estudo amplia essa constatação ao incorporar um conjunto mais diversificado de dados, abrangendo diferentes contextos climáticos e estudos publicados ao longo de várias décadas, e ao utilizar o diagrama b-f-m como ferramenta sintética de análise comparativa.

Embora o clima não se apresente como um controlador primário da geometria hidráulica, os resultados indicam que ele pode exercer influência indireta ao modular a variabilidade dos ajustes hidráulicos. Essa influência manifesta-se principalmente na dispersão dos expoentes e na frequência relativa de posicionamento dos pontos em determinadas subdivisões do diagrama, particularmente nos grupos climáticos árido, frio e polar, que apresentaram maior heterogeneidade dos dados.

A predominância da condição $f > b$ em todos os grupos sugere que, de modo geral, os canais fluviais tendem a ajustar-se prioritariamente por meio do aumento da profundidade em resposta à vazão, enquanto a largura apresenta resposta menos sensível. Esse comportamento pode ser interpretado como um mecanismo de autorregulação hidráulica do canal, no qual a geometria se ajusta de modo a acomodar variações de vazão sem mudanças estruturais significativas na forma da seção transversal.

No que se refere à subdivisão $m=f$, a concentração dos pontos sobre ou abaixo dessa linha indica que a resposta da velocidade à variação de vazão é proporcional ou subproporcional à resposta da profundidade. Esse padrão sugere ausência de aumento sistemático da sensibilidade da velocidade, o que implica que a competência hidráulica potencial associada à velocidade não apresenta variação climática consistente. Assim, as inferências relativas ao transporte de sedimentos devem ser interpretadas com cautela, reconhecendo-se que o diagrama b-f-m fornece apenas uma indicação indireta do potencial hidráulico, e não uma medida direta da competência sedimentológica.

A análise da subdivisão $m=f/2$ indica predominância de condições associadas à manutenção ou redução do número de Froude com o aumento da vazão, caracterizando, em termos gerais, escoamentos subcríticos. A maior dispersão observada em alguns grupos climáticos sugere maior variabilidade do regime hidráulico, possivelmente associada a hidrogramas mais irregulares, eventos extremos ou controles locais, mas sem evidência de alteração sistemática do regime de escoamento em função do clima.

Em relação à subdivisão $m=b+f$, a predominância de pontos abaixo dessa linha indica que o crescimento da área molhada ocorre de forma mais rápida do que o aumento da velocidade, sugerindo ajustes hidráulicos associados à expansão da seção transversal e a condições de estabilidade relativa do leito e das margens. Esse padrão recorrente reforça a interpretação de que os canais fluviais tendem a acomodar variações de vazão por meio de ajustes geométricos que limitam o aumento da energia específica do escoamento.

A análise da subdivisão $m/f=2/3$ indica que variações na rugosidade hidráulica desempenham papel importante nos ajustes observados, especialmente considerando que a declividade tende a apresentar pouca variação em função da vazão. A maior dispersão observada em climas frios e polares pode refletir a influência de fatores adicionais,

como presença de gelo, material de leito mais grosso e forte sazonalidade hidrológica, que afetam os mecanismos de rugosidade e a resposta hidráulica local.

Seybold et al. (2021) indicam que, mesmo em escala global, a tectônica exerce controle dominante sobre os perfis longitudinais dos rios, superando a influência direta do clima. Essa indicação apresenta consistência com os resultados deste estudo, que indicam ausência de controle climático primário sobre a geometria hidráulica.

Os resultados sugerem que a geometria hidráulica apresenta elevado grau de robustez estrutural frente às diferenças climáticas globais. O clima atua como um modulador secundário, influenciando a variabilidade e a dispersão dos ajustes hidráulicos, mas não alterando os padrões fundamentais de relação entre largura, profundidade e velocidade. Essa interpretação reforça a validade da geometria hidráulica como ferramenta conceitual para a análise comparativa de sistemas fluviais e destaca a importância de controles locais e hidrodinâmicos na definição da forma dos canais.

4.1 A relação entre o clima e a instabilidade dos canais

Evidências recentes demonstram que o clima pode imprimir assinaturas mensuráveis na dinâmica fluvial, influenciando a estabilidade dos canais, o transporte de sedimentos e a propensão a processos erosivos, especialmente quando analisados em escalas hidrológicas interanuais a decadais (Phillips et al., 2024; Slater et al., 2019). Rios que permanecem por longos períodos próximos ou acima da vazão de cheia tendem a apresentar maior exposição das margens a tensões de cisalhamento, favorecendo processos de erosão lateral e ajustes morfológicos do canal (Phillips et al., 2024).

Os resultados obtidos neste estudo, contudo, indicam que essas influências climáticas não se traduzem em mudanças sistemáticas nos padrões estruturais médios da geometria hidráulica, expressos pelos expoentes b , f e m . Conforme evidenciado no Tópico 3, os diferentes grupos climáticos apresentaram posicionamento semelhante em relação às subdivisões do diagrama b – f – m , sugerindo que o clima não atua como um controlador primário da instabilidade estrutural média dos canais fluviais, mas sim como um fator modulador da variabilidade dos ajustes hidráulicos.

Nesse sentido, a instabilidade observada em determinados grupos climáticos deve ser interpretada como resultado de processos hidrológicos e

geomorfológicos que operam em escalas temporais e espaciais distintas daquelas capturadas pelas relações empíricas da geometria hidráulica média. Estudos recentes mostram que, em escalas interanuais a decadais, a capacidade de escoamento do canal pode se ajustar de forma coerente aos modos de variabilidade climática, com fases de aumento e diminuição sistemática do transporte de sedimentos, afetando a estabilidade das margens e o comportamento morfológico do canal (Slater et al., 2019).

A maior dispersão dos expoentes observada nos grupos climáticos A (tropical), B (seco) e D (frio) sugere maior sensibilidade desses sistemas a processos erosivos e a ajustes hidráulicos episódicos. Nos grupos A e B, essa maior variabilidade pode ser associada às características de seus regimes hidrológicos. Rios tropicais frequentemente apresentam hidrologia persistente ou sazonal, com eventos de precipitação intensa capazes de gerar picos de vazão que atuam sobre margens compostas por solos profundos e altamente intemperizados, favorecendo a erosão lateral. Em climas secos, a hidrologia extrema e errática, aliada à escassa cobertura vegetal, expõe as margens a cheias infrequentes, porém de elevada magnitude, resultando em processos erosivos intensos e localizados (Phillips et al., 2024).

O grupo climático frio apresentou a maior sensibilidade relativa à instabilidade, o que pode estar associado a processos específicos desses ambientes. Ciclos de congelamento e descongelamento reduzem a coesão dos materiais das margens, enquanto o degelo sazonal pode gerar eventos de cheia de alta energia que atuam sobre um substrato previamente fragilizado, intensificando a erosão fluvial. Em contraste, os grupos climáticos temperado (C) e polar (E) apresentaram maior tendência à estabilidade relativa, possivelmente associada, no caso do grupo C, a regimes de precipitação mais distribuídos ao longo do ano e a uma cobertura vegetal mais densa, que contribuem para a proteção das margens (Phillips et al., 2024).

No grupo climático polar, a maior estabilidade observada pode estar relacionada à presença de *permafrost* nas margens, que atua como um agente cimentante, aumentando significativamente a resistência do material à erosão fluvial, mesmo durante períodos de degelo superficial. Em escala de bacia, diferenças climáticas também influenciam a conectividade da rede fluvial, com climas úmidos tendendo a apresentar maior ramificação lateral e climas secos exibindo padrões mais simples, o que

afeta a propagação de pulsos de sedimento e, conseqüentemente, a estabilidade do canal (Bavojdan et al., 2025).

Dessa forma, os resultados indicam que o clima exerce influência relevante sobre a instabilidade dos canais fluviais, não por meio da alteração dos padrões estruturais médios da geometria hidráulica, mas pela modulação da variabilidade hidrológica, da frequência de eventos extremos e das condições ambientais locais. A geometria hidráulica captura o comportamento médio e autorregulado do canal, enquanto os processos de instabilidade e erosão refletem respostas dinâmicas e episódicas que operam em escalas temporais mais curtas e que extrapolam o escopo das relações $b-f-m$.

Resultados semelhantes foram reportados por Seybold et al. (2017), que identificaram assinaturas climáticas na geometria de redes fluviais apenas quando analisadas em escalas espaciais mais amplas. Esses autores destacam que, em escalas locais, os ajustes hidráulicos refletem predominantemente processos de autorregulação associados à hidrodinâmica e às condições de contorno do canal, o que está em consonância com os padrões observados neste estudo.

4.2 A influência do clima na competência de transporte de sedimentos

A avaliação da influência do clima na competência de transporte de sedimentos a partir da geometria hidráulica deve ser conduzida com cautela, uma vez que os expoentes b , f e m e suas relações no diagrama $b-f-m$ não constituem medidas diretas de transporte sedimentar, mas indicam respostas hidráulicas relativas da largura, profundidade e velocidade à variação de vazão.

A coexistência de diferentes subdivisões no diagrama $b-f-m$, mesmo dentro de um mesmo grupo climático, reforça a interpretação de que a geometria hidráulica reflete equilíbrios dinâmicos múltiplos, e não relações causais únicas. Xu et al. (2021) demonstram que distintas relações hidráulicas podem emergir de combinações específicas entre regime hidrológico, geometria do canal e condições de resistência ao escoamento, sem que isso implique diferenças sistemáticas impostas pelo clima médio.

Os resultados mostram que, em todos os grupos climáticos analisados, os valores do expoente m concentram-se predominantemente sobre ou abaixo da subdivisão $m=f$, indicando que a resposta da velocidade é proporcional ou subproporcional à resposta da profundidade. Esse padrão sugere

que não há evidência de aumento sistemático da sensibilidade da velocidade à vazão em função do clima, o que implica ausência de um controle climático direto sobre a competência hidráulica média inferida a partir da geometria hidráulica.

De forma semelhante, a predominância de pontos próximos ou abaixo da subdivisão $m=f/2$ em todos os grupos climáticos indica que o número de Froude tende a se manter constante ou a diminuir com o aumento da vazão, caracterizando predominantemente condições de escoamento subcríticas. Esse comportamento reforça a interpretação de que a geometria hidráulica reflete ajustes hidráulicos estáveis e autorregulados, independentemente do domínio climático.

No entanto, as diferenças observadas na dispersão dos valores de m , particularmente nos grupos árido, frio e polar, indicam maior variabilidade na resposta hidráulica da velocidade à vazão. Essa variabilidade pode estar associada a regimes hidrológicos mais irregulares, maior intermitência do escoamento ou maior influência de eventos extremos, fatores que afetam o transporte de sedimentos de forma episódica, e não como um estado médio contínuo.

Alterações temporárias na geometria hidráulica associadas a eventos hidrológicos extremos, como ciclones tropicais, têm sido documentadas em estudos regionais (Li et al., 2022). Esses resultados reforçam que o clima pode influenciar a geometria hidráulica em escalas episódicas e transitórias, enquanto os padrões médios analisados neste estudo refletem ajustes estruturais de longo prazo.

Dessa forma, embora o clima não se mostre um controlador primário da competência de transporte de sedimentos quando analisada por meio da geometria hidráulica média, ele pode influenciar indiretamente os processos de transporte ao modular a variabilidade hidrológica e a ocorrência de condições hidrodinâmicas extremas. A geometria hidráulica, nesse contexto, fornece uma visão estrutural dos ajustes do canal, enquanto o transporte efetivo de sedimentos depende de processos transitórios e de controles locais que extrapolam o escopo das relações $b-f-m$.

4.3 Limitações e perspectivas futuras

Os resultados obtidos estão em consonância com abordagens contemporâneas que interpretam a geometria hidráulica como uma expressão de autorregulação fluvial, na qual múltiplos controles, incluindo hidrologia, resistência do leito, conectividade sedimentar e herança geomorfológica, in-

teragem para produzir padrões médios semelhantes em diferentes contextos climáticos (Xu et al., 2021).

É fundamental reconhecer que este estudo buscou tendências globais, simplificando interações complexas. A principal limitação, conforme apontado na introdução, é a não inclusão de fatores como geologia, cobertura vegetal específica, geomorfologia local e ações antrópicas, que podem influenciar diretamente a geometria do canal e mascarar o sinal climático. A alta variabilidade nos períodos de medição dos dados (de 1953 a 2020) também é um fator a ser considerado, visto que os canais podem ter respondido a diferentes condições climáticas ao longo do tempo.

Pesquisas futuras poderiam focar em isolar variáveis, por exemplo, comparando rios em uma mesma zona climática, mas com substratos geológicos distintos, ou analisando o impacto de mudanças no uso da terra sobre os expoentes da geometria hidráulica dentro de uma mesma bacia hidrográfica.

Adicionalmente, a variabilidade observada nos expoentes b , f e m está associada às incertezas inerentes aos dados de campo e aos procedimentos de ajuste das curvas hidráulicas. Afshari et al. (2017) demonstram que ruídos observacionais e escolhas metodológicas influenciam significativamente a dispersão dos expoentes estimados, embora os valores médios permaneçam estatisticamente robustos. Esse aspecto reforça a adequação do uso de grandes compilações de dados para análises comparativas globais, como a realizada neste estudo.

5 CONCLUSÕES

A aplicação da teoria da geometria hidráulica aos dados analisados neste trabalho demonstrou ser uma ferramenta robusta para a identificação de padrões estruturais médios do comportamento hidráulico de seções transversais de canais naturais em diferentes domínios climáticos. A análise dos expoentes b , f e m , associada ao uso do diagrama b – f – m , permitiu avaliar de forma comparativa os ajustes hidráulicos das seções fluviais em escala global, evidenciando tendências consistentes independentemente do tipo climático.

Os resultados indicam que, apesar das marcantes diferenças climáticas entre os grupos A (tropical), B (seco), C (temperado), D (frio) e E (polar), os padrões estruturais da geometria hidráulica são amplamente semelhantes. Em todos os grupos

climáticos, observou-se predominância de respostas caracterizadas por $f > b$ e valores de m concentrados nas subdivisões centrais do diagrama, o que sugere que o clima não atua como um controlador primário da geometria hidráulica média dos canais fluviais. Esses achados corroboram resultados clássicos da literatura e reforçam a interpretação da geometria hidráulica como um sistema autorregulado.

Embora não tenham sido identificadas diferenças sistemáticas nos padrões estruturais médios da geometria hidráulica entre os climas, o estudo evidenciou variações relevantes na dispersão dos expoentes e na ocorrência de valores extremos, especialmente nos grupos árido, frio e polar. Essas diferenças indicam que o clima exerce influência indireta ao modular a variabilidade dos ajustes hidráulicos, afetando a sensibilidade dos canais a processos hidrodinâmicos episódicos, sem alterar os padrões médios de resposta capturados pelas relações b – f – m .

É importante ressaltar que os dados analisados abrangem períodos de medição extensos, variando aproximadamente entre 1953 e 2020, o que implica que os resultados representam uma síntese de comportamentos médios ao longo de diferentes contextos climáticos históricos. Dessa forma, os padrões identificados não necessariamente refletem de maneira direta as condições climáticas contemporâneas ou os efeitos recentes das mudanças climáticas observadas nas últimas décadas.

Do ponto de vista aplicado, os resultados fornecem subsídios para diagnósticos comparativos rápidos de estabilidade hidráulica relativa e para a priorização de intervenções de baixo impacto, como manejo da vegetação ripária, proteção de margens e definição de janelas sazonais de obras, desde que utilizados de forma integrada a informações hidrológicas, geomorfológicas e sedimentológicas locais. A geometria hidráulica, nesse contexto, deve ser compreendida como uma ferramenta de apoio à análise estrutural dos canais, e não como um indicador direto de processos hidrossedimentológicos dinâmicos. Para pesquisas futuras, recomenda-se: (i) a amostragem sistemática de pares de bacias com geologias contrastantes dentro de uma mesma zona climática, de modo a isolar o papel dos controles litológicos e geomorfológicos; (ii) o monitoramento de séries de dados contemporâneas, especialmente pós-2010, visando avaliar possíveis alterações associadas às mudanças climáticas recentes; e (iii) a integração dos expoentes b – f – m com métricas de vegetação ripária, conectividade

sedimentar e variabilidade hidrológica, permitindo o desenvolvimento de modelos multivariados mais completos para a avaliação da estabilidade e do potencial hidrodinâmico dos canais fluviais.

6 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Em oportuno, gostaríamos de expressar o nosso mais profundo agradecimento ao corpo de pareceristas da revista *Derbyana* pela valiosa contribuição na avaliação por pares.

7 REFERÊNCIAS

- Adeyemi, O., Olutoyin, F., & Olumide, O. (2020). Downstream hydraulic geometry across headwater channels in upper Ogun River basin, southwestern Nigeria. *African Geographical Review*, 39(4), 345–360. <https://doi.org/10.1080/19376812.2020.1720756>
- Afshari, S., Fekete, B. M., Dingman, S. L., Devineni, N., Bjerklie, D. M., & Khanbilvardi, R. M. (2017). Statistical filtering of river survey and streamflow data for improving At-A-Station hydraulic geometry relations. *Journal of Hydrology*, 547, 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.038>
- Aquino, S., Stevaux, J. C., & Latrubesse, E. M. (2005). Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 6(2), 29–41. <https://doi.org/10.20502/rbg.v6i2.49>
- Bavojdan, A. H., Ranjbar, S., Wang, D., & Singh, A. (2025). Signatures of varying climate on geomorphic and topologic characteristics of channel networks. *Water Resources Research*, 61, Article e2024WR038760. <https://doi.org/10.1029/2024WR038760>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Berg, A., & Wood, E. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), Article 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Chen, S.-A., Michaelides, K., Grieve, S. W. D., & Singer, M. B. (2019). Aridity is expressed in river topography globally. *Nature*, 573(7775), 573–577. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1558-8>
- Cui, D., Liang, S., & Wang, D. (2021). Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(3), Article e701. <https://doi.org/10.1002/wcc.701>
- Grisson, F., & Kobiyama, M. (2011). Teoria e aplicação da geometria hidráulica: revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 12(2), 25–38. <https://doi.org/10.20502/rbg.v12i2.232>
- Grisson, F., Mota, A. A., & Kobiyama, M. (2014). Geometria hidráulica de seções transversais do rio dos Bugres. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(4), 205–213. <http://doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p205-213>
- Knighton, A. D. (1972). Changes in a braided reach. *Geological Society of America Bulletin*, 83(12), 3813–3822. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[3813:CIA BR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[3813:CIA BR]2.0.CO;2)
- Langbein, W. B., & Schumm, S. A. (1958). Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(6), 1076–1084. <https://doi.org/10.1029/TR039i006p01076>
- Leopold, L. B., & Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *United States Geological Survey (Professional paper, 252)*. <https://doi.org/10.3133/pp252>
- Leopold, L. B., & Skibitzke, H. E. (1967). Observations on unmeasured rivers. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 49(2-4), 247–255. <https://doi.org/10.1080/04353676.1967.11879754>
- Li, Y., Wright, D. B., & Bledsoe, B. P. (2022). Watershed controls and tropical cyclone-induced changes in river hydraulic geometry in Puerto Rico. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, Article 101268. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101268>
- Magalhães Júnior, A. P., & De Paula Barros, L. F. 2020. *Hidrogeomorfologia: formas,*

processos e registros sedimentares fluviais. Editora Bertrand Brasil.

- Park, Chris C. (1977). World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: An analysis and some observations. *Journal of Hydrology*, 33(1-2), 133–146. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90103-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90103-2)
- Pereira, M. A. F., Kobiyama, M., & Castro, N. M. R. (2014). Relação entre a geometria hidráulica e a curva de permanência em estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Ijuí-RS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(3), 443–454. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i3.516>
- Phillips, P. J., & Harlin, J. M. (1984). Spatial dependency of hydraulic geometry exponents in a subalpine stream. *Journal of Hydrology*, 71(3-4), 277–283. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90101-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90101-X)
- Phillips, C. B., Masteller, C. C., Blaylock, J., Van I., F., & Johnson, J. P. L. (2024). Variability in river width reveals climatic influence on channel geometry. *Geophysical Research Letters*, 51, Article e2024GL111789. <https://doi.org/10.1029/2024GL111789>
- Ponton, J. R. (1972). *Hydraulic geometry of Green and Birkenhead rivers: Southwestern Coast Mountains, British Columbia*. [Tese de Doutorado, University of British Columbia].
- Qin, C., Wu, B., Wang, Y., Fu, X., Xue, Y., Li, D., Li, M. & Zhang, Y. (2020). Dynamic variability of at-a-station hydraulic-geometry for mountain rivers in the southeast Qinghai-Tibet Plateau: The cases of Yalong River and upper Jinsha River. *Catena*, 194, Article 104723. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104723>
- Ran, L., Wang, S., & Lu, X. X. (2012). Hydraulic geometry change of a large river: a case study of the upper Yellow River. *Environmental Earth Sciences*, 66, 1247–1257. <http://doi.org/10.1007/s12665-011-1336-x>
- Rhodes, D. D. (1977). The bfm diagram; graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry. *American Journal of Science*, 277(1), 73–96. <https://doi.org/10.2475/ajs.277.1.73>
- Schumm, S. A., & Rea, D. K. (1995). Sediment yield from disturbed earth systems. *Geology*, 23(5), 391–394. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023%3C0391:SYFDES%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023%3C0391:SYFDES%3E2.3.CO;2)
- Seybold, H., Berghuijs, W. R., Prancevic, J. P., & Kirchner, J. W. (2021). Global dominance of tectonics over climate in shaping river longitudinal profiles. *Nature Geoscience*, 14, 503–507. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00720-5>
- Seybold, H., Rothman, D. H., & Kirchner, J. W. (2017). Climate's watermark in the geometry of stream networks. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2272–2280. <https://doi.org/10.1002/2016GL072089>
- Slater, L. J., Khouakhi, A., & Wilby, R. L. (2019). River channel conveyance capacity adjusts to modes of climate variability. *Scientific Reports*, 9, Article 12619. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48782-1>
- Stall, J. B., & Yang, C. T. (1970). *Hydraulic geometry of 12 selected stream systems of the United States* (Research Report, 32). Water Resources Research Center, University of Illinois. <https://hdl.handle.net/2142/90167>
- United States Geological Survey. 2023. *Diagram of Channel Cross Section with Subsections*. USGS. <https://www.usgs.gov/media/images/diagram-channel-cross-section-subsections>. Acessado em 19 nov. 2023.
- Wolman, M. G. (1955). The natural channel of Brandywine creek, Pennsylvania. *US Government Printing Office*. <https://doi.org/10.3133/pp271>
- Yuce, M. I., Esit, M., Karatas, M. C. (2019). Hydraulic geometry analysis of ceyhan river, Turkey. *SN Applied Sciences*, 1(1-11). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0800-1>
- Xu, F., Coco, G., Townend, I., Guo, L., He, Q., Zhao, K., & Zhou, Z. (2021). Rationalizing the Differences Among Hydraulic Relationships Using a Process-Based Model. *Water Resources Research*, 57(8). <https://doi.org/10.1029/2020WR029430>

Manuscrito submetido em 20 de outubro de 2025, aceito em 3 de março de 2026.

Como citar: Santos, H. L. B., Manzione, R. L. 2026. Influência do clima na geometria hidráulica das seções transversais de rios naturais. *Derbyana*, 47, Artigo e886.

Contribuição dos autores: H.L.B.S.: Conceitualização, Redação do manuscrito original, Metodologia, Coleta e organização dos dados, Aplicação dos diagramas triaxiais. R.L.M.: Metodologia, Redação - revisão.

Conflito de interesses: Os autores declaram que não há conflito de interesse.



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.