

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **AGRUPAMENTO DE CHEIAS HISTÓRICAS EM RIO NEGRO/PR, UTILIZANDO O MÉTODO FUZZY C-MEANS**

*Michely Rauen<sup>1</sup> ; Patrícia Cristina Steffen<sup>2</sup> ; Julio Gomes<sup>3</sup> ; Eloy Kaviski<sup>4</sup> & Daniel Henrique*

*Marco Detzel<sup>5</sup>*

**Abstract:** In Brazil, the frequency of flood events has increased significantly, due to both natural and anthropogenic factors. Non-planned urban expansion, changes in land use and occupation, and climate change contribute substantially to increasing the frequency and severity of floods. The municipality of Rio Negro in Paraná state has a vast history of floods, observed over the years. In this sense, aiming to understand the hydrological behavior of the Negro River basin and the flood formation mechanisms, this study sought to characterize such events by grouping historical floods, based on a set of eight severity flood indicators. The Fuzzy C-Means method was applied to the floods observed from 1931 to 2015 at the Rio Negro fluvimetric station (65100000). Clusters were defined in four different scenarios, considering precipitation as a severity indicator and Principal Component Analysis (PCA) to define a second set of indicators. The results showed clusters were better defined when the *accumulated precipitation* was included in the indicators set and the principal components were used for clustering. The PCA indicated that *maximum discharge, maximum water level, flood volume, and accumulated precipitation* were the most significative indicators for clustering.

**Resumo:** No Brasil, a frequência de eventos de cheia tem aumentado significativamente, devido a fatores naturais e antropogênicos. A expansão urbana não planejada, mudanças no uso e ocupação da terra e as mudanças climáticas contribuem substancialmente para o aumento da frequência e severidade das cheias. O município de Rio Negro, no estado do Paraná, tem uma vasta história de cheias, observadas ao longo dos anos. Nesse sentido, com o objetivo de entender o comportamento hidrológico da bacia do rio Negro e os mecanismos de formação das cheias, este estudo buscou caracterizar tais eventos agrupando cheias históricas, com base em um conjunto de oito indicadores de severidade de cheia. O método Fuzzy C-Means foi aplicado às cheias observadas de 1931 a 2015 na estação fluviométrica do Rio Negro (6510000). Os agrupamentos foram definidos em quatro cenários diferentes, considerando a precipitação como um dos indicadores de severidade e a Análise de Componentes Principais (ACP) para definir um segundo conjunto de indicadores. Os resultados mostraram que os grupos foram mais bem definidos quando a precipitação acumulada foi incluída no conjunto de indicadores e os componentes principais foram utilizados para agrupamento. A ACP indicou que a *vazão máxima, o nível da água máximo, volume da cheia e a precipitação acumulada* foram os indicadores mais significativos para o agrupamento.

**Palavras-Chave** – Agrupamento de cheias; Indicador de severidade de cheia; Lógica difusa

1) Mestranda, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Centro Politécnico, Curitiba/PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), [michelyrauen@ufpr.br](mailto:michelyrauen@ufpr.br).

2) Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Instituto de Ciências Exatas e da Terra (ICET), Campus Universitário do Araguaia, Barra do Garças/MT, [patricia.steffen@ufmt.br](mailto:patricia.steffen@ufmt.br)

3) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), Centro Politécnico, Curitiba/PR, [igomes.dhs@ufpr.br](mailto:igomes.dhs@ufpr.br)

4) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), Centro Politécnico, Curitiba/PR, [eloy.dhs.erha23@gmail.com](mailto:eloy.dhs.erha23@gmail.com)

5) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), Centro Politécnico, Curitiba/PR, [detzel@ufpr.br](mailto:detzel@ufpr.br)

## INTRODUÇÃO

Historicamente, o desenvolvimento humano sempre esteve intrinsecamente ligado à disponibilidade de água, fosse para captação e consumo ou para transporte. Este vínculo essencial levou ao estabelecimento e crescimento de civilizações ao longo das margens dos rios. No contexto contemporâneo, nossas cidades, fruto desse desenvolvimento urbano inicial, enfrentam novos desafios impostos pelas mudanças climáticas, que aumentam a susceptibilidade a desastres naturais, acentuando os riscos e impactos associados à gestão dos recursos hídricos.

O Brasil está entre os países que possuem maior reserva de água doce do mundo. Porém, devido às dimensões geográficas e variabilidade climática, a água se apresenta de diversas maneiras, seja em abundância ou em escassez. Os desastres relacionados aos recursos hídricos estão frequentemente associados tanto ao excesso de água, quanto à escassez de água, resultando em diversos impactos sobre a sociedade, que abrangem danos ao meio ambiente, alterações na dinâmica urbana, prejuízos à produção agrícola e, sobretudo, afetam negativamente a qualidade da vida.

Considerando a frequência das cheias observadas no município de Rio Negro, estado do Paraná e os consequentes impactos sociais, ambientais, urbanos e sanitários, se faz necessário o estudo aprofundado destas ocorrências, visando a compreensão dos mecanismos que levam à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio Negro, afluente do rio Iguaçu, e que banha a cidade de mesmo nome. Neste contexto, a análise combinada das características hidrológicas dos eventos de cheia pode produzir uma compreensão avançada destes, auxiliando na tomada de decisões mediante eventos extremos. Seguindo essa abordagem, podem ser utilizados métodos de agrupamento de cheias, cujo objetivo é estabelecer grupos de cheias com mesmas características hidrológicas e, por meio da análise dos indicadores utilizados para o agrupamento, auxiliar no entendimento dos seus mecanismos formadores.

O objetivo geral desta pesquisa é agrupar as cheias ocorridas em Rio Negro, utilizando o método *Fuzzy C-means*, considerando indicadores de severidade de cheia como referência, dentre estes a precipitação, e analisar o efeito do uso dos componentes principais em substituição aos indicadores de severidade sobre o agrupamento das cheias.

No contexto do agrupamento de cheias históricas na bacia do rio Iguaçu, insere-se este trabalho, tendo como base os estudos realizados por Steffen e Gomes (2018, 2023a, 2023b) que utilizaram o método *Fuzzy C-means* (FCM) para o agrupamento de cheias históricas observadas no rio Iguaçu na cidade de União da Vitoria, estado do Paraná, a partir de um conjunto de indicadores de severidade de cheias.

Esses indicadores são concebidos para capturar a magnitude e o agrupamento das cheias. No entanto, a intensidade de um evento de cheia não pode ser plenamente caracterizada por um único indicador isolado. Por essa razão, a técnica de agrupamento de cheias se torna fundamental, permitindo uma análise mais abrangente dos impactos das inundações em uma região específica (WANG *et al.*, 2014).

Estudos relacionados ao agrupamento de cheias, aplicam diversos indicadores que traduzem intensidade das cheias. Wang *et al.* (2014) utilizaram cinco indicadores para caracterizar os eventos ocorridos no rio Wujiang na China, incluindo pico de vazão, o nível de pico, o volume máximo de 24 h, o volume máximo de 72 h e o volume total de inundação. Steffen e Gomes (2018), por sua vez, utilizaram sete indicadores, sendo: vazão máxima anual, nível de água máximo anual, volume total extravasado, tempo acima do limiar de extravasamento, tempo entre o início do evento e ultrapassagem do limiar de extravasamento e taxas médias de subida e recessão do hidrograma de cheia.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo e dados utilizados

O município de Rio Negro localiza-se ao sul do estado do Paraná, divisa com Santa Catarina, e está a aproximadamente 120 km da capital do estado, Curitiba. Faz divisa com os municípios Campo do Tenente, Lapa e Piên, pertencentes ao estado do Paraná, e Mafra e Rio Negrinho, pertencentes ao estado de Santa Catarina (IBGE, 2024). Segundo dados do IBGE (2022), Rio Negro apresenta uma população de 31.324 habitantes, distribuída em uma área de 604,138 km<sup>2</sup>, resultando em uma densidade demográfica de aproximadamente 52 hab/km<sup>2</sup>.

O rio Negro, afluente da margem esquerda do rio Iguaçu, possui cerca de 200 km de extensão, abrangendo seu alto e médio curso. A sua bacia hidrográfica possui uma área total de aproximadamente 5.450 km<sup>2</sup> e abrange vários municípios do planalto catarinense e leste do Paraná, como o próprio município de Rio Negro/PR e a cidade vizinha Mafra/SC (Prefeitura Municipal de Rio Negro, 2008). A Figura 1 apresenta a localização da bacia hidrográfica do rio Negro.

**Figura 1** – Localização da bacia hidrográfica do rio Negro (ANA, 2024).



Os dados de vazão são referentes à estação fluviométrica Rio Negro (65100000) que possui uma área de contribuição de 3.450 km<sup>2</sup> e os dados de precipitação são da estação pluviométrica Rio Negro (02649006). O período de dados utilizados para o estudo compreendeu os anos de 1931 a 2015. No referido período, a vazão média de longo termo foi de 70,5 m<sup>3</sup>/s e as vazões mínima e máxima foram aproximadamente 7,7 m<sup>3</sup>/s e 953,9 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Destaca-se que, no período de 1940 a 1949, há falha na série de vazões, mas existem dados de leitura de régua para o período mencionado, o que permitiu o preenchimento das falhas, a partir da curva de descarga da estação fluviométrica.

### Seleção dos eventos de cheia

A seleção dos eventos de cheia teve por base as informações da Defesa Civil da cidade de Rio Negro. Foram selecionados os eventos de cheia cujo nível máximo foi superior a leitura de régua de 6,00 m junto à estação fluviométrica Rio Negro (65100000) e que representa a cota de alerta para a Defesa Civil. Cabe destacar que, a partir da leitura de régua de 6,90 m, há extravasamento do rio Negro, produzindo impactos no município de Rio Negro. A Tabela 1 apresenta uma relação dos 56

eventos selecionados com a respectiva data de início, destacando-se que houve extravasamento em 47 eventos.

**Tabela 1** – Cheias observadas na Estação Fluviométrica Rio Negro (65100000) selecionadas para o estudo.

nº	data de início						
1	25/09/1935	15	10/06/1971	29	19/01/1990	43	26/10/2004
2	28/06/1938	16	30/09/1972	30	04/06/1990	44	02/09/2005
3	28/11/1939	17	26/06/1973	31	21/07/1990	45	30/10/2005
4	20/06/1942	18	29/08/1973	32	29/05/1992	46	23/05/2007
5	02/02/1946	19	04/10/1975	33	26/09/1993	47	06/10/2008
6	11/07/1946	20	26/11/1975	34	09/07/1995	48	12/09/2009
7	08/08/1948	21	27/08/1980	35	10/07/1996	49	14/01/2010
8	24/10/1953	22	23/12/1980	36	23/01/1997	50	15/12/2010
9	19/05/1954	23	15/11/1982	37	12/10/1997	51	15/02/2011
10	21/05/1955	24	20/05/1983	38	09/01/1998	52	03/08/2011
11	06/07/1955	25	08/08/1984	39	25/04/1998	53	06/06/2012
12	21/07/1957	26	22/05/1987	40	15/08/1998	54	22/06/2013
13	03/11/1961	27	24/05/1988	41	04/07/1999	55	08/06/2014
14	25/12/1970	28	14/09/1989	42	22/09/2002	56	12/10/2015

### Indicadores de severidade de cheias

Os indicadores de severidade de cheia utilizados no presente estudo foram: *vazão máxima* ( $I_1$ ); *nível de água máximo* ( $I_2$ ); *volume acima da cota de alerta* ( $I_3$ ); *tempo acima da cota de alerta* ( $I_4$ ); *tempo entre o início do evento e a ultrapassagem da cota de alerta* ( $I_5$ ); *taxa média de ascensão inicial do hidrograma* ( $I_6$ ); *taxa média de recessão inicial do hidrograma* ( $I_7$ ); e *precipitação acumulada* ( $I_8$ ). Informações mais detalhadas sobre a metodologia de cálculo de cada um dos indicadores é apresentada em Rauen (2025). Os indicadores mencionados foram calculados para todos os eventos selecionados. A Tabela 2 apresenta as estatísticas básicas dos 8 indicadores (brutos) adotados no presente trabalho, onde se destaca o valor do coeficiente de variação do indicador *volume acima da cota de alerta* ( $I_3$ ).

### Pré-tratamento dos dados utilizados para o agrupamento

O tratamento inicial dos dados é necessário em razão das diferenças físicas e de ordem de grandeza dos indicadores utilizados para o agrupamento, como é possível verificar a partir dos valores apresentados na Tabela 2. No presente trabalho, aplicou-se o método *Auto-scaling* para normalizar as variáveis. O referido método é uma forma de padronização de dados, utilizada para transformar variáveis em uma escala de pontuação padrão (Mohamad e Usman, 2013), conforme a Equação 1:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

onde  $z_{ij}$  é o valor tratado da  $i$ -ésima observação do  $j$ -ésimo indicador;  $x_{ij}$  é valor amostral da  $i$ -ésima observação do  $j$ -ésimo indicador; e  $\bar{x}_j$  e  $\sigma_j$  são respectivamente a média e o desvio-padrão amostrais do  $j$ -ésimo indicador.

A Tabela 2 apresenta as estatísticas básicas dos 8 indicadores normalizados pelo método *Auto-scaling* e a Tabela 3 apresenta a correlação entre os indicadores de cheia normalizados. Observa-se, na Tabela 2, que o efeito da padronização resulta em todos os indicadores apresentando média igual a 0 (zero) e desvio-padrão unitário.

**Tabela 2** – Estatísticas básicas dos indicadores de cheia brutos e normalizados.

Parâmetro	Indicadores Brutos							
	I <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	I <sub>2</sub> (cm)	I <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /s)	I <sub>4</sub> (dia)	I <sub>5</sub> (dia)	I <sub>6</sub> (m <sup>3</sup> /s/dia)	I <sub>7</sub> (m <sup>3</sup> /s/dia)	I <sub>8</sub> (mm)
Média	412,8	810,6	884,8	8,4	12,4	32,7	33,1	269,5
Desvio-padrão	137,3	179,3	1493,9	8,2	8,1	26,5	18,2	177,6
Coeficiente de variação (%)	33,3	22,1	168,8	97,6	65,3	81,0	55,0	65,9
Assimetria	2,69	2,19	3,53	2,44	0,94	1,66	0,96	3,86
Mínimo	301,3	600,0	22,1	1,0	2,2	7,0	2,0	62,8
Máximo	953,9	1462,0	8802,9	43,0	35,6	117,5	88,7	1308,6
Indicadores Normalizados (auto-scaling)								
Parâmetro	I <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	I <sub>2</sub> (cm)	I <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /s)	I <sub>4</sub> (dia)	I <sub>5</sub> (dia)	I <sub>6</sub> (m <sup>3</sup> /s/dia)	I <sub>7</sub> (m <sup>3</sup> /s/dia)	I <sub>8</sub> (mm)
Média	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Desvio-padrão	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Assimetria	2,69	2,19	3,53	2,44	0,94	1,66	0,96	3,86
Mínimo	-0,81	-1,17	-0,58	-0,90	-1,25	-0,97	-1,71	-1,16
Máximo	3,94	3,63	5,30	4,22	2,86	3,20	3,06	5,85

**Tabela 3** – Matriz de correlação entre os indicadores de cheia normalizados.

	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>
I <sub>1</sub>	<b>1,000</b>	0,976	0,932	0,649	0,075	0,043	0,469	0,696
I <sub>2</sub>	0,976	<b>1,000</b>	0,892	0,641	0,103	0,015	0,477	0,668
I <sub>3</sub>	0,932	0,892	<b>1,000</b>	0,801	0,156	-0,057	0,225	0,819
I <sub>4</sub>	0,649	0,641	0,801	<b>1,000</b>	0,274	-0,143	-0,067	0,682
I <sub>5</sub>	0,075	0,103	0,156	0,274	<b>1,000</b>	-0,738	-0,041	0,082
I <sub>6</sub>	0,043	0,015	-0,057	-0,143	-0,738	<b>1,000</b>	0,125	-0,097
I <sub>7</sub>	0,469	0,477	0,225	-0,067	-0,041	0,125	<b>1,000</b>	0,153
I <sub>8</sub>	0,696	0,668	0,819	0,682	0,082	-0,097	0,153	<b>1,000</b>

Em relação à Tabela 3, verifica-se valores de correlação elevados entre alguns dos indicadores, o que sugere a possibilidade de utilização da Análise de Componentes Principais (ACP) para diminuição da dimensionalidade do problema. Para maiores detalhes sobre a ACP, recomenda-se consultar Hair Jr. *et al.* (2009), por exemplo.

### Método Fuzzy C-means (FCM)

Conforme descrito por Hall e Minns (1999), Wang *et al.* (2014) e Steffen e Gomes (2018), o algoritmo FCM busca estabelecer graus de pertinência ( $u$ ) entre os dados e os grupos formados (Equação 2), representando as semelhanças entre as observações da amostra e cada um dos grupos.

$$u_{i_k} = \left[ \sum_{j=1}^K \left( \frac{d_{i_k}}{d_{j_k}} \right)^{\frac{2}{r-1}} \right]^{-1} \quad (2)$$

onde  $u_{i_k}$  é o grau de pertinência da  $i$ -ésima observação ao  $k$ -ésimo grupo;  $d_{i_k}$  é a distância euclidiana da  $i$ -ésima observação ao centro do  $k$ -ésimo grupo;  $d_{j_k}$  é a distância euclidiana da  $j$ -ésima observação ao centro do  $k$ -ésimo grupo;  $r$  é o parâmetro de incerteza; e  $K$  é o número de grupos.

As coordenadas do centro de cada grupo podem ser calculadas a partir da Equação 3 (Hall e Minns, 1999; Wang *et al.*, 2014 e Steffen e Gomes, 2018):

$$v_{j_k} = \frac{\sum_{k=1}^K (u_{i_k})^r x_{ij}}{\sum_{k=1}^K (u_{i_k})^r} \quad (3)$$

onde  $v_{j_k}$  é a coordenada do  $j$ -ésimo indicador no centróide do  $k$ -ésimo grupo;  $x_{ij}$  é o valor tratado da  $i$ -ésima observação do  $j$ -ésimo indicador;  $u_{i_k}$  é o grau de pertinência da  $i$ -ésima observação ao  $k$ -ésimo grupo; e  $K$  é o número total de grupos.

Os graus de pertinência ( $u_{i_k}$ ) são representados por uma matriz de pertinência  $U$ , que contém os graus de associação de cada ponto aos diferentes grupos (*clusters*). Dado que o número de graus de pertinência ( $u_{i_k}$ ) é ilimitado em razão dos valores possíveis para  $r$  (grau de incerteza), utiliza-se uma função-objetivo ( $F_{ob}$ ) para realizar o agrupamento dos dados, ou seja, para definir o melhor valor de  $r$  e estabelecer os valores da matriz  $U$ . A função-objetivo ( $F_{ob}$ ) serve como um critério de categorização, sendo expressa pela Equação 4 (Hall e Minns, 1999; Wang *et al.*, 2014 e Steffen e Gomes, 2018):

$$F_{ob} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (u_{i_k})^r (d_{i_k})^2 \quad (4)$$

onde  $I$  é o número de observações e demais variáveis já definidas anteriormente.

Segundo Hall e Minns (1999),  $r$  (parâmetro de incerteza) é um parâmetro de ponderação que controla a quantidade de "fuzziness" no processo de classificação. Quando  $r = 1$ , a partição se torna rígida, mas à medida que  $r$  aumenta, as atribuições de pertencimento (aderência) do agrupamento se tornam mais difusas. Para Ross (1995), os valores de  $r$  devem variar em um intervalo de  $1,25 < r < 2$ .

### Determinação do número de grupos ( $K$ ) e do parâmetro de incerteza ( $r$ )

Para a realização do agrupamento, seguiu-se o método iterativo sugerido por Bezdek *et al.* (1983) e utilizado por Steffen e Gomes (2018). O método *Fuzzy C-Means* (FCM) apresenta uma convergência rápida na prática, com resultados consistentes geralmente após 10 a 25 iterações. No entanto, a minimização da função-objetivo ( $F_{ob}$ ) nem sempre leva a agrupamentos visualmente ou interpretativamente significativos.

Para melhorar a qualidade dos agrupamentos, são utilizados parâmetros de validade, como o coeficiente de partição ( $F_c$ ), que mede a separação entre grupos, e a entropia ( $H_c$ ), que avalia a sobreposição entre grupos. Conforme definido por Bezdek *et al.* (1983), tais parâmetros podem ser obtidos por meio das Equações 5 e 6 a seguir:

$$F_c = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (u_{i_k})^2 / I \quad (5)$$

$$H_c = - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (u_{i_k} \log_{10}(u_{i_k})) / I \quad (6)$$

Os valores de  $F_c$  variam entre  $\frac{1}{K}$  e 1. Quando  $F_c = \frac{1}{K}$  reflete uma partição uniformemente distribuída, caracterizada pela ausência de distinções claras entre os grupos. Em contraste, quando

$F_c = 1$ , a partição apresenta uma rigidez absoluta, indicando que cada elemento pertence exclusivamente a um único grupo, sem qualquer ambiguidade.

A entropia  $H_c$ , por sua vez, varia entre 0 (zero) e  $\log_{10}(K)$ . Quando  $H_c = 0$  evidencia agrupamentos bem definidos, com fronteiras nítidas. Por outro lado,  $H_c = \log_{10}(K)$  denota elevada sobreposição entre os grupos, revelando uma estrutura particionada com significativa ambiguidade. De forma análoga, o complemento  $(1 - F_c)$  do coeficiente de partição ( $F_c$ ) também reflete a qualidade do agrupamento, sendo que valores próximos a zero indicam clusters nítidos e pouco sobrepostos, enquanto valores maiores significam maior sobreposição dos dados.

Seguindo o proposto por Ross (1995), utilizou-se no presente estudo, um intervalo de  $r$  entre 1,25 e 2,00, incrementado a cada 0,25. Para o número de grupos, utilizou-se valores inteiros de  $K$  variando entre 2 e, no máximo, 8 (número de indicadores de cheia), onde o número máximo de grupos variou conforme a alternativa de agrupamento analisada.

### Alternativas de agrupamento analisadas

Para esse estudo, foram definidas 4 alternativas de agrupamento distintas para a avaliar a influência do indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ) e da Análise de Componentes Principais (ACP) sobre o agrupamento, contemplando as seguintes alternativas:

- Alternativa 1: **sem** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ) e **sem** ACP;
- Alternativa 2: **com** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ) e **sem** ACP;
- Alternativa 3: **sem** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ) e **com** ACP;
- Alternativa 4: **com** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ) e **com** ACP.

Para avaliar o desempenho das quatro alternativas de agrupamento distintas, realizou-se uma comparação entre elas por meio das métricas de validade dos *clusters*: coeficiente de partição ( $F_c$ ), entropia ( $H_c$ ) e complemento do coeficiente de partição ( $1 - F_c$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 resume os resultados obtidos na Análise de Componentes Principais (ACP). Foram adotados os componentes principais que mais contribuíram para a explicação da variância amostral e cuja soma explicava, no mínimo, 90% da variância.

**Tabela 4** – Resumo dos resultados da Análise de Componentes Principais (ACP).

Indicador	Alternativa 3 – pesos dos indicadores			Alternativa 4 – pesos dos indicadores			
	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>	CP <sub>3</sub>	CP <sub>1</sub>
I <sub>1</sub>	0,510	0,126	0,054	0,462	0,134	0,119	-0,160
I <sub>2</sub>	0,505	0,108	0,085	0,455	0,116	0,152	-0,200
I <sub>3</sub>	0,505	-0,002	-0,184	0,472	0,004	-0,128	-0,033
I <sub>4</sub>	0,413	-0,174	-0,451	0,389	-0,170	-0,381	-0,313
I <sub>5</sub>	0,117	-0,647	0,248	0,098	-0,644	0,277	-0,353
I <sub>6</sub>	-0,045	0,666	-0,239	-0,045	0,664	-0,228	-0,389
I <sub>7</sub>	0,212	0,283	0,796	0,174	0,289	0,789	0,126
I <sub>8</sub>	---	---	---	0,404	-0,018	-0,223	0,737
variância explicada (acumulada)	51,8 (51,8)	25,9 (77,7)	14,6 (92,3)	53,2 (53,2)	22,8 (76,0)	13,3 (89,3)	4,7 (94,0)

A análise conjunta dos pesos de cada indicador (I) nos componentes principais (CP) e da variância explicada por cada CP mostrou que os indicadores *vazão máxima*, *nível da água máxima* e

volume acima da cota de alerta na Alternativa 3, acrescido do indicador *precipitação acumulada* na alternativa 4, foram os indicadores mais significativos para o agrupamento.

Os valores de  $F_c$ ,  $(1 - F_c)$  e  $H_c$  para todas as combinações possíveis de valores de  $r$  (grau de incerteza) e de  $K$  (número de grupos), utilizados no presente estudo, mostraram que os melhores agrupamentos foram obtidos para  $r = 1,25$  e  $K = 2$  para todas as 4 alternativas analisadas.

A Tabela 5 apresenta para fins de comparação os valores de  $F_c$ ,  $(1 - F_c)$  e  $H_c$  somente para  $r = 1,25$  e  $K = 2$  para as 4 alternativas. Analisando-se os valores apresentados na Tabela 4, verifica-se que o melhor agrupamento resultou para a alternativa 4 - **com** precipitação e **com** ACP. Contudo, os resultados obtidos foram relativamente próximos entre si, comparando-se as 4 alternativas.

**Tabela 5** – Valores de  $F_c$ ,  $(1 - F_c)$  e  $H_c$  para  $r = 1,25$  e  $K = 2$ .

Alternativa	$F_c$	$(1 - F_c)$	$H_c$
1	0,977	0,023	0,044
2	0,976	0,024	0,045
3	0,981	0,019	0,037
4	0,992	0,008	0,016

Especificamente em relação ao indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ), os valores obtidos para  $F_c$ ,  $(1 - F_c)$  e  $H_c$  para as alternativas 1 e 2 (**sem** ACP) foram praticamente iguais. Já para as alternativas 3 e 4 (**com** ACP), verifica-se uma pequena melhoria nos valores de  $F_c$ ,  $(1 - F_c)$  e  $H_c$  quando se insere indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ) no conjunto de indicadores para o agrupamento ou na definição dos componentes principais.

Especificamente em relação ao uso da ACP, verifica-se que há uma melhoria nos valores de  $F_c$ ,  $(1 - F_c)$  e  $H_c$  quando se compararam as alternativas 1 e 3 (**sem** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ )) e quando se compararam as alternativas 2 e 4 (**sem** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ ))). Contudo, novamente se destaca que os resultados, em termos de valores de  $F_c$ ,  $(1 - F_c)$  e  $H_c$  foram relativamente próximos entre as 4 alternativas.

A Tabela 6 apresenta os graus de pertinência ( $u$ ) para os eventos classificados no Grupo 2. Destaca-se que os eventos não apresentados na referida tabela foram todos classificados no Grupo 1. Há que se destacar que as alternativas 1, 2 e 3 apresentaram o mesmo agrupamento com os eventos 1946.1, 1957, 1983, 1992, 2010.1, 2011.2 e 2014 classificados no Grupo 2. Já para alternativa 4, somente foram classificados no Grupo 2 os eventos 1983, 1992 e 2014, sendo os eventos 1946.1, 1957, 2010.1 e 2011.2 classificados no Grupo 1. Portanto a alternativa 4 se mostrou mais restritiva em termos de classificação dos eventos no Grupo 2. Destaca-se ainda o grau de pertinência ( $u$ ) relativamente baixo para o evento 2011.2 nas alternativas 1, 2 e 3.

**Tabela 6** – Graus de pertinência ( $u$ ) para os eventos classificados no Grupo 2.

Ano	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
1946.1	0,983	0,982	0,986	0,016*
1957	0,910	0,747	0,931	0,025*
1983	0,994	0,987	0,995	0,997
1992	0,999	0,999	0,999	0,999
2010.1	0,999	1,000	1,000	0,145*
2011.2	0,640	0,815	0,685	0,007*
2014	0,964	0,972	0,965	0,987

**Obs:** \* maior aderência ao Grupo 1, portanto classificados no Grupo 1 para a alternativa 4.

Embora os resultados obtidos na alternativa 4 tenham sido ligeiramente superiores em termos de agrupamento, os resultados apresentados a seguir focam nos agrupamentos definidos pelas alternativas 1, 2 e 3 por resultarem em maior número de eventos classificados no Grupo 2.

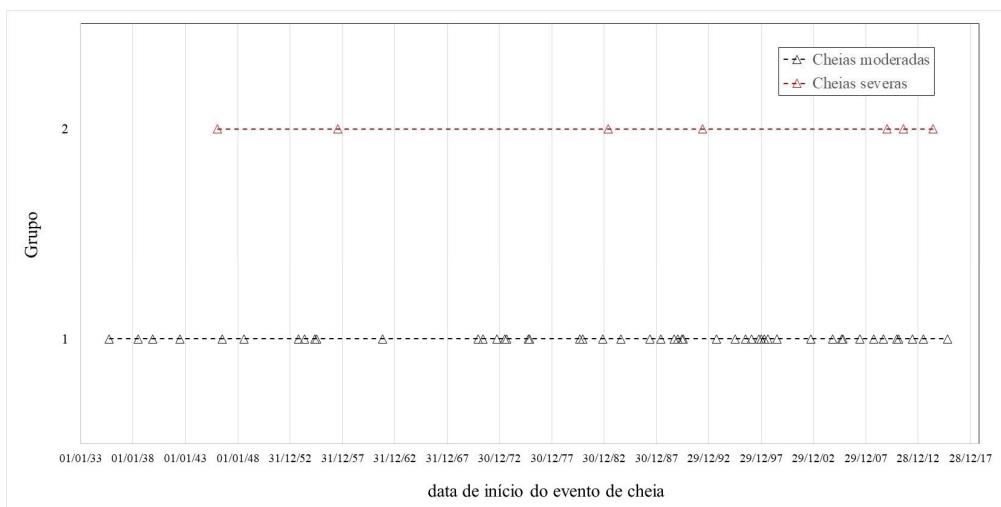
A Tabela 7 apresenta as estatísticas básicas dos grupos definidos nos agrupamentos das alternativas 1, 2 e 3. Observa-se, a partir dos valores da Tabela 7, que o Grupo 2 contém os maiores eventos de cheia observados na estação fluviométrica Rio Negro (65100000) ao longo do período do estudo. Desta forma, denominou-se Grupo 1 – cheias moderadas e Grupo 2 – cheias severas.

**Tabela 7** – Estatística básica dos indicadores dos grupos definidos nos agrupamentos das alternativas 1, 2 e 3

Grupo	I <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	I <sub>2</sub> (cm)	I <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /s)	I <sub>4</sub> (dia)	I <sub>5</sub> (dia)	I <sub>6</sub> (m <sup>3</sup> /s/dia)	I <sub>7</sub> (m <sup>3</sup> /s/dia)	I <sub>8</sub> (mm)
<b>1 (média)</b>	<b>370,9</b>	<b>758,9</b>	<b>417,0</b>	<b>6,3</b>	<b>11,5</b>	<b>33,7</b>	<b>31,2</b>	<b>229,9</b>
1 (mínimo)	301,3	600,0	22,1	1,0	2,2	7,0	2,0	62,8
1 (máximo)	518,7	1008,0	1398,3	25,0	34,0	117,5	88,7	512,8
<b>2 (média)</b>	<b>705,8</b>	<b>1172,3</b>	<b>4159,4</b>	<b>23,0</b>	<b>18,4</b>	<b>25,9</b>	<b>46,4</b>	<b>546,9</b>
2 (mínimo)	520,0	944,0	1733,3	11,0	2,5	7,7	6,5	165,5
2 (máximo)	953,9	1462,0	8802,9	43,0	35,6	100,5	79,5	1308,6

A Figura 2 apresenta a cronologia dos eventos analisados no presente estudo, classificados conforme os agrupamentos obtidos nas Alternativas 1, 2 e 3. Verifica-se, em ambos os grupos, uma maior frequência de eventos de cheia no período mais recente, a partir da década de 1970.

**Figura 2** – Cronologia dos eventos conforme classificação obtida nas alternativas 1, 2 e 3.



## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando-se o objetivo do estudo, as cheias observadas na estação fluviométrica Rio Negro (65100000), localizada no rio Negro, no município de Rio Negro/PR, no período de 1931 a 2015 foram classificadas em dois grupos, aqui denominados por suas características em: Grupo 1 – cheias moderadas e Grupo 2 – cheias severas. Do conjunto de 6 eventos selecionados e para as 4 alternativas de agrupamento analisadas, a maioria dos eventos foi classificado no Grupo 1. Nas alternativas 1, 2 e 3, sete eventos foram classificados no Grupo 2 e somente três eventos foram classificados no referido grupo na Alternativa 4.

A inclusão do indicador *precipitação acumulada* (I<sub>8</sub>) não produziu melhoria no agrupamento para as alternativas 1 e 2 (**sem ACP**) e verificou-se uma pequena melhoria no agrupamento para as alternativas 3 e 4 (**com ACP**). Em relação ao uso da ACP, observou-se uma melhoria no agrupamento

quando se compararam as alternativas 1 e 3 (**sem** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ )) e quando se compararam as alternativas 2 e 4 (**sem** indicador *precipitação acumulada* ( $I_8$ )). Contudo, os resultados em termos de agrupamento foram relativamente próximos entre as 4 alternativas.

A análise conjunta dos resultados da ACP mostrou que os indicadores *vazão máxima, nível da água máximo e volume de acima da cota de alerta* na Alternativa 3, acrescido do indicador *precipitação acumulada* na alternativa 4, foram os indicadores mais significativos para o agrupamento.

Recomenda-se que estudos futuros considerem a inclusão de variáveis de uso e ocupação do solo, a fim de ampliar a compreensão sobre os fatores que influenciam a severidade das cheias. Além disso, a aplicação da metodologia a outras bacias hidrográficas pode consolidar sua aplicabilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisão em diferentes contextos regionais.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2024). *Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH*. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br>. Acesso em: 19 maio 2024.
- BEZDEK, J. C.; EHRLICH, R.; FULL, W. (1983). “*FCM: the fuzzy C-means clustering algorithm*”. *Computers & Geosciences*, 10(2-3), p. 191-203.
- HAIR Jr., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. (2009). *Análise multivariada de dados*. 6. ed. Editora Bookman, 688 p.
- HALL, J.; MINNS, A. W. (1999). “*The classification of hydrologically homogeneous regions*”. *Hydrological Science Journal*, 44 (5), p. 693-704.
- IBGE. (2022). *Brasil/Paraná/Rio Negro*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/rio-negro/panorama>. Acesso em: 13 jul. 2024.
- IBGE. (2024). *Municípios limítrofes*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/42224-municipios-limitrofes.html>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- MOHAMAD, I. B.; USMAN, D. (2013). “*Standardization and its effects on K-means clustering algorithm*”. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 6(17), p. 3299-3303.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO NEGRO. (2008). *Plano Municipal de Gestão dos Recursos Hídricos*. Prefeitura Municipal de Rio Negro, RZS Consultoria e Planejamento Ltda, 239 p.
- RAUEN, M. (2025). *Agrupamento de cheias históricas em Rio Negro – Paraná, utilizando o método fuzzy C-means*. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental).
- ROSS, T. J. (1995). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons Ltda., 600 p.
- STEFFEN, P. C.; GOMES, J. (2018). “*Clustering of historical floods observed on Iguaçu River, in União da Vitória, Paraná*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 23(1), p. 1-12.
- STEFFEN, P. C.; GOMES, J. (2023a). “*Características de cheias observadas na bacia do rio Iguaçu - parte 1: agrupamento de eventos*” in Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, Nov. 2023, 1, pp. 1-10.
- STEFFEN, P. C.; GOMES, J. (2023b). “*Características de cheias observadas na bacia do rio Iguaçu - parte 2: avaliação de eventos observados*” in Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, Nov. 2023, 1, pp. 1-10.
- WANG, L. N.; CHEN, X. H.; SHAO, Q. X.; LI, Y. (2014). “*Flood indicators and their clustering features in Wujiang River, South China*”. *Ecological Engineering*, 76(1), p. 66-74.