



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ERMESON GOMES COELHO

**TIPOLOGIA FISIAGRÁFICA DAS BACIAS CONTRIBUINTES DAS ESTAÇÕES
FLUVIOMÉTRICAS DO ESTADO DO CEARÁ OBTIDA POR ANÁLISE DE
AGRUPAMENTO**

CRATEÚS

2026

ERMESON GOMES COELHO

TIPOLOGIA FISIAGRÁFICA DAS BACIAS CONTRIBUINTES DAS ESTAÇÕES
FLUVIOMÉTRICAS DO ESTADO DO CEARÁ OBTIDA POR ANÁLISE DE
AGRUPAMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil do campus Crateús da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell
Barros Alexandre

CRATEÚS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C615t Coelho, Ermeson Gomes.
Tipologia fisiográfica das bacias contribuintes das estações fluviométricas do estado do Ceará obtida por análise de agrupamento / Ermeson Gomes Coelho. – 2026.
70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.

1. Bacias hidrográficas. 2. Análise multivariada. 3. Semiárido. I. Título.

CDD 004

ERMESON GOMES COELHO

TIPOLOGIA FISIAGRÁFICA DAS BACIAS CONTRIBUINTES DAS ESTAÇÕES
FLUVIOMÉTRICAS DO ESTADO DO CEARÁ OBTIDA POR ANÁLISE DE
AGRUPAMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil do campus Crateús da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre

Aprovado em: 19/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alan Barros Alexandre (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita
Universidade Federal do Ceará - UFC

Profa. Dra. Déborah Mithya Barros Alexandre
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de conclusão de curso à Deus, e à minha família, em especial aos meus pais Ana e Paulo Coelho que sempre estiveram ao meu lado me apoiando de todas as formas possíveis.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me conceder força, coragem, espírito, sabedoria e esperança ao longo dessa grande jornada. Com a sua graça obtive resultados satisfatórios e continuei firme e forte.

Aos meus pais Ana e Paulo, meus irmãos Edson, Eduardo, Edvaldo, Edmar, Edilson, Maria, Regina e Ana Célia que sempre estiveram ao meu lado, acreditando e torcendo por meu sucesso e me dando apoio de diversas formas.

Aos meus amigos, Cauet, Roberto, Leonardo, Matheus, Maressa, Amanda, Guilherme, Fabrício, Mariano, Gildézio, Carlos Davyd, Ruth, Thais Peres, Ronald Sena e Keven, que acompanharam toda a trajetória.

Ao meu professor e orientador, Alan Michell, minha gratidão por toda paciência, dedicação e ensinamentos compartilhados.

À banca examinadora, agradeço pelas valiosas considerações e sugestões que enriqueceram este trabalho.

Agradecimento especial ao meu amigo Pablo pelo excelente suporte no desenvolvimento do trabalho.

E por fim a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão dessa pesquisa.

“Deus nunca nos dá um fardo maior do que podemos suportar.”

Kenyu Yukimiya (Blue Lock)

RESUMO

A disponibilidade hídrica no semiárido cearense é fortemente condicionada pelo comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, o que torna essencial conhecer de forma integrada suas características físicas. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar fisiograficamente e propor uma tipologia das bacias de contribuição associadas às estações fluviométricas do estado do Ceará, visando subsidiar estudos de regionalização hidrológica e apoiar a gestão dos recursos hídricos. Delimitaram-se, em ambiente SIG (QGIS/GRASS), 63 bacias contribuintes a partir de Modelo Digital de Elevação hidrologicamente consistente, tomando as estações fluviométricas como exutórios. Para cada bacia foram calculados parâmetros de forma e drenagem, relevo, solos, uso e cobertura da terra e litologia. As variáveis foram padronizadas e submetidas à Análise de Componentes Principais (PCA), que permitiu sintetizar a maior parte da variância dos dados em três componentes principais. Em seguida, aplicou-se o algoritmo K-means no espaço das componentes principais, testando-se as soluções com K=4, K=5 e K=6. A escolha de K=5 baseou-se na combinação entre o índice silhouette, a coerência fisiográfica interna dos grupos e a sua organização espacial. A partir das médias das variáveis em cada cluster e de sua distribuição no território, foram identificados cinco tipos de bacias: (i) bacias cristalinas dissecadas com CN elevado; (ii) macro-bacias cristalinas alongadas; (iii) bacias com armazenamento alto e drenagem mais rarefeita; (iv) bacias transicionais pouco cristalinas e mais circulares; e (v) pequenas bacias íngremes associadas a escarpas e planaltos. A tipologia obtida mostrou-se compatível com os principais domínios geológicos e unidades de relevo do estado, constituindo um quadro de referência útil para a comparação entre bacias, para a seleção de unidades representativas e para a regionalização de informações hidrológicas em áreas com dados escassos.

Palavras-chave: bacias hidrográficas; análise multivariada; semiárido.

ABSTRACT

The hydrological availability in the semi-arid region of Ceará is strongly controlled by the behaviour of its river basins, which makes an integrated knowledge of their physical characteristics essential. This study aims to physiographically characterize and propose a typology for the contributing basins associated with streamflow gauging stations in Ceará, in order to support hydrological regionalization studies and water resources management. A total of 63 contributing basins were delineated in a GIS environment (QGIS/GRASS) from a hydrologically conditioned Digital Elevation Model, using the gauging stations as outlets. For each basin, parameters describing basin size and shape, drainage network, relief, soils, land use/land cover and lithology were computed. The variables were standardized and subjected to Principal Component Analysis (PCA), which condensed most of the data variance into three principal components. K-means clustering was then applied in the PCA space, and the solutions with K=4, K=5 and K=6 were compared. The configuration with K=5 was selected based on silhouette index values, internal physiographic consistency and spatial coherence of the clusters. From the mean values of the variables in each cluster and their spatial distribution, five types of basins were identified: (i) crystalline dissected basins with high Curve Number; (ii) large elongated crystalline basins; (iii) basins with high soil water storage capacity and lower drainage density; (iv) transitional basins with lower crystalline proportion and more circular shapes; and (v) small steep basins associated with escarpments and plateaus. The resulting typology is consistent with the main geological domains and relief units of the state and provides a useful framework for basin comparison, selection of representative units and regionalization of hydrological information in data-scarce areas.

Keywords: river basins; multivariate analysis; semiarid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do Ciclo Hidrológico.....	19
Figura 2 - Fluxograma da Metodologia utilizada.....	30
Figura 3 - Mapa de localização das Estações Fluviométricas.....	31
Figura 4 - Etapas de delimitação das bacias de contribuição das estações fluviométricas.....	34
Figura 5 - Bacias de contribuição das estações fluviométricas no estado do Ceará.....	38
Figura 6 - Scree plot da Análise de Componentes Principais.....	42
Figura 7 - Agrupamentos (K-means) no plano PC1×PC2: K=4, K=5 e K=6.....	46
Figura 8 - Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de Ward) para K = 4.....	47
Figura 9 - Distribuição espacial dos grupos para K=4.....	49
Figura 10 - Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de Ward) para K = 5.....	50
Figura 11 - Distribuição espacial dos grupos para K=5.....	53
Figura 12 - Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de Ward) para K = 6.....	54
Figura 13 - Distribuição espacial dos grupos para K=6.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tamanhos de células para o MDE, segundo USGS.....	23
Quadro 2 - Classificação dos Índices de Circularidades.....	26
Quadro 3 - Principais bases de dados utilizadas no estudo.....	33
Quadro 4 - Distribuição das bacias por tipo fisiográfico (K=5).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos parâmetros fisiográficos.....	38
Tabela 2 - Matriz de correlação de Pearson.....	39
Tabela 3 - Autovalores e variância explicada dos componentes principais.....	40
Tabela 4 - Cargas fatoriais das variáveis fisiográficas.....	41
Tabela 5 - Intervalos das variáveis fisiográficas por grupo de cluster para K=4.....	46
Tabela 6 - Intervalos das variáveis fisiográficas por grupo de cluster para K=5.....	50
Tabela 7 - Intervalos das variáveis fisiográficas por grupo de cluster para K=6.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANADEM	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente da ANA
CAD	Capacidade de Armazenamento de Água no Solo
CN	<i>Curve Number</i>
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
Crist	Percentual de área da bacia em embasamento cristalino
Dd	Densidade de Drenagem
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GRASS GIS	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Ic	Índice de Circularidade
Kc	Coefficiente de Compacidade
Lt	Comprimento total dos cursos d'água
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MERIT DEM	<i>Multi-Error-Removed Improved-Terrain Digital Elevation Model</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
SCS	Serviço de Conservação de Solos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
UTM	Projeção Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Contextualização e Justificativa.....	16
1.2 Organização dos capítulos do TCC.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1 Ciclo Hidrológico.....	19
3.2 Bacia Hidrográfica.....	19
3.3 Geoprocessamento e a Gestão dos Recursos Hídricos.....	20
3.3.1 <i>Importância do geoprocessamento na hidrologia.....</i>	<i>20</i>
3.3.2 <i>Sistemas de Informações Geográficas (SIG).....</i>	<i>21</i>
3.4 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	21
3.5 Estações Fluviométricas.....	22
3.6 Caracterização Fisiográfica.....	23
3.6.1 <i>Área de Drenagem e Perímetro.....</i>	<i>23</i>
3.6.2 <i>Comprimento total dos cursos d'água e Rio Principal.....</i>	<i>23</i>
3.6.3 <i>Densidade de drenagem (Dd).....</i>	<i>24</i>
3.6.4 <i>Coefficiente de compacidade (Kc).....</i>	<i>24</i>
3.6.5 <i>Índice de circularidade (Ic).....</i>	<i>25</i>
3.6.6 <i>Declividade média da bacia (Decliv).....</i>	<i>25</i>
3.6.7 <i>Capacidade de Armazenamento do Solo (CAD).....</i>	<i>26</i>
3.6.8 <i>Curve Number (CN).....</i>	<i>26</i>
3.6.9 <i>Percentual da bacia sobre solo cristalino (Crist).....</i>	<i>27</i>
3.7 Análise Estatística Multivariada.....	27
3.7.1 <i>Análise de Componentes Principais (PCA).....</i>	<i>27</i>
3.7.2 <i>Análise de agrupamento.....</i>	<i>29</i>
4. METODOLOGIA.....	30
4.1 Área de estudo.....	30
4.2 Base de dados.....	32
4.3 Ferramentas e ambientes computacionais.....	32
4.4 Delimitação das Bacias Hidrográficas.....	33
4.5 Cálculo dos Parâmetros fisiográficos.....	34
4.6 Análise exploratória e correlação entre variáveis.....	35
4.7 Procedimentos de análise estatística multivariada.....	35
4.7.1 <i>Pré-processamento e padronização dos dados.....</i>	<i>35</i>
4.7.2 <i>Análise de Componentes Principais (PCA).....</i>	<i>36</i>
4.7.3 <i>Agrupamento (clusterização) por k-means.....</i>	<i>36</i>
4.8 Representação Cartográfica.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38

5.1	Bacias de contribuição das estações fluviométricas.....	38
5.2	Parâmetros fisiográficos das bacias de contribuição.....	39
5.3	Correlação entre variáveis fisiográficas.....	40
5.4	Análise de Componentes Principais (PCA).....	41
5.4.1	<i>Variância explicada.....</i>	<i>41</i>
5.4.2	<i>Cargas fatoriais e interpretação dos componentes.....</i>	<i>42</i>
5.5	Agrupamento das bacias (K-Means).....	43
5.5.1	<i>Definição do número de clusters.....</i>	<i>44</i>
5.5.2	<i>Estrutura geral dos agrupamentos no espaço dos componentes principais.....</i>	<i>44</i>
5.6	Agrupamento para K=4.....	46
5.6.1	<i>Caracterização fisiográfica dos grupos para K=4.....</i>	<i>47</i>
5.6.2	<i>Representação espacial dos grupos para K = 4.....</i>	<i>48</i>
5.7	Agrupamento para K=5.....	50
5.7.1	<i>Caracterização fisiográfica dos grupos para K=5.....</i>	<i>50</i>
5.7.2	<i>Representação espacial dos grupos para K = 5.....</i>	<i>52</i>
5.8	Agrupamento para K=6.....	54
5.8.1	<i>Caracterização fisiográfica dos grupos para K=6.....</i>	<i>54</i>
5.8.2	<i>Representação espacial dos grupos para K = 6.....</i>	<i>56</i>
5.9	Síntese comparativa e tipologia adotada.....	58
5.9.1	<i>Crêterios de escolha e justificativa da adoção de K = 5.....</i>	<i>58</i>
5.9.2	<i>Tipologia fisiográfica adotada.....</i>	<i>59</i>
6.	CONCLUSÃO.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62
	APÊNDICES.....	65

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Justificativa

O estado do Ceará encontra-se inserido predominantemente no domínio climático semiárido, marcado por precipitações irregulares no espaço e no tempo, forte concentração das chuvas em poucos meses do ano e recorrência de secas prolongadas (Ab'Sáber, 2003). Nessas condições, a disponibilidade hídrica superficial depende de forma significativa de reservatórios artificiais e de estruturas de derivação, o que torna a compreensão do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas um requisito central para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, cujos fundamentos são estabelecidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Brasil, 1997). Essa necessidade torna-se ainda mais evidente quando se considera que as séries de vazão disponíveis são, em geral, curtas, descontínuas ou espacialmente concentradas em um número reduzido de seções de monitoramento (Tucci, 2007).

As estações fluviométricas representam os principais pontos de observação do regime de vazões, permitindo o acompanhamento de eventos extremos, a análise de tendências e a calibração de modelos hidrológicos. Cada estação está associada a uma bacia de contribuição, cuja resposta às precipitações é condicionada por um conjunto de características fisiográficas, tais como relevo, litologia, solos, uso e cobertura da terra e organização da rede de drenagem (Villela; Mattos, 1975). No Ceará, a coexistência de extensas áreas de embasamento cristalino, com solos rasos e baixa capacidade de armazenamento de água, e de compartimentos sedimentares, em geral com condições mais favoráveis à infiltração, produz um mosaico de bacias com comportamentos hidrológicos potencialmente distintos, mesmo sob um mesmo forçamento climático.

A análise física dessas bacias, por meio de parâmetros morfométricos, geológicos, pedológicos e de uso e cobertura da terra, oferece uma base objetiva para investigar a relação entre fisiografia e escoamento. Entretanto, o grande número de variáveis que podem ser consideradas e as correlações existentes entre elas limitam a interpretação baseada apenas em estatísticas univariadas. Nesse contexto, técnicas de análise estatística multivariada, como a Análise de Componentes Principais (PCA) e a análise de agrupamento (cluster analysis), tornam-se ferramentas adequadas para sintetizar os principais gradientes de variação, reduzir a dimensionalidade do problema e identificar grupos de bacias com perfis fisiográficos semelhantes (Hair et al., 2009).

No caso cearense, essa abordagem é particularmente relevante. A rede fluviométrica não cobre de forma homogênea todas as bacias de interesse para o planejamento hídrico, e muitas unidades de drenagem carecem de séries de vazão consistentes. A construção de uma tipologia fisiográfica das bacias de contribuição associadas às estações fluviométricas pode apoiar estudos de regionalização hidrológica, que visam a transferência de informações entre bacias monitoradas e não monitoradas, e fornecer critérios adicionais para a definição de regiões hidrologicamente homogêneas (Naghetini; Pinto, 2007).

Abordagens baseadas na integração de atributos de bacias e técnicas multivariadas têm sido empregadas para identificar conjuntos hidrologicamente homogêneos e subsidiar processos de regionalização, combinando redução de dimensionalidade e métodos de agrupamento para explicitar padrões espaciais e físicos. Estudos recentes aplicaram estratégias análogas em diferentes contextos hidroclimáticos, incluindo regionalização territorial por clusterização (Rami et al., 2022), identificação de bacias homogêneas com apoio de PCA e K-means (Mihret et al., 2024). Nesse sentido, a integração entre dados geoespaciais, ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e métodos multivariados constitui uma estratégia alinhada a essa literatura e adequada para avançar na compreensão dos padrões espaciais das bacias monitoradas no estado do Ceará e para fortalecer a base técnico-científica utilizada na gestão dos recursos hídricos em escala estadual e regional.

1.2 Organização dos capítulos do TCC

A estrutura deste trabalho organiza-se em capítulos. Após esta introdução, o Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando conceitos de bacias hidrográficas, parâmetros fisiográficos, uso de geoprocessamento e SIG, bem como fundamentos de análise estatística multivariada aplicados a estudos de bacias. O Capítulo 3 descreve a área de estudo e a rede de estações fluviométricas consideradas, destacando o contexto físico e hidrológico do estado do Ceará.

O Capítulo 4 detalha os materiais e métodos empregados, incluindo as bases de dados geoespaciais utilizadas, os procedimentos de delimitação das bacias de contribuição, o cálculo dos parâmetros fisiográficos e a implementação das técnicas de PCA e análise de agrupamento. O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos, com ênfase na caracterização fisiográfica das bacias, na interpretação dos componentes principais, na formação dos grupos de bacias e na tipologia fisiográfica proposta. Por fim, o Capítulo 6 reúne as conclusões do estudo e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar fisiograficamente e propor uma tipologia para bacias de contribuição das estações fluviométricas do estado do Ceará, por meio de análise estatística multivariada, utilizando variáveis de litologia, relevo, solos, uso e cobertura da terra e morfometria.

2.2 Objetivos específicos

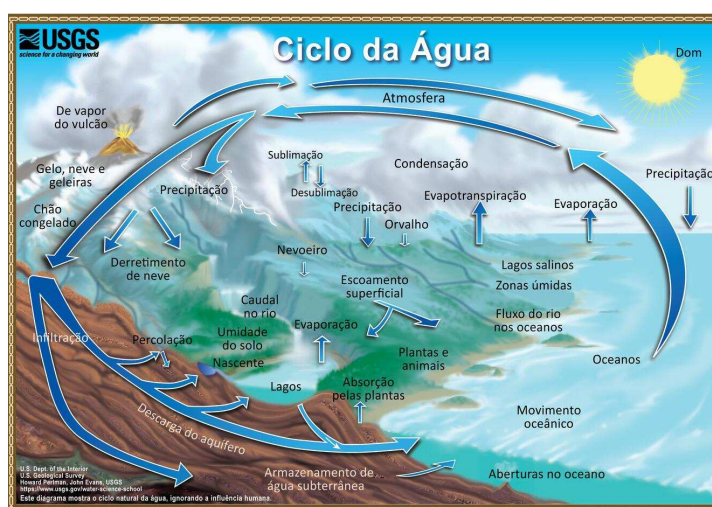
- Delimitar, em ambiente SIG, as bacias de contribuição das estações fluviométricas do estado do Ceará.
- Calcular parâmetros fisiográficos selecionados (morfometria, litologia, solos, uso e cobertura da terra) para cada bacia.
- Reduzir e sintetizar o conjunto de variáveis por meio de análise estatística multivariada.
- Classificar as bacias em grupos fisiograficamente homogêneos com o algoritmo K-Means e analisar sua distribuição espacial no estado.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é o processo contínuo de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, envolvendo evaporação e transpiração, condensação, precipitação, infiltração e escoamento superficial e subterrâneo (Schiavetti; Camargo, 2002), conforme mostra a figura 1. A água evaporada de oceanos, rios, lagos e solos condensa-se na atmosfera, origina nuvens e retorna à superfície na forma de precipitação, podendo infiltrar-se no solo, ser interceptada pela vegetação ou escoar sobre a superfície em direção aos cursos d'água (Silveira, 1997; Pinto; Holtz; Martins, 2003). A distribuição espacial e temporal desses processos é controlada por fatores climáticos, fisiográficos e de uso da terra, o que confere grande variabilidade ao ciclo em diferentes regiões. Tucci (2007) destaca que, em escala global, o ciclo pode ser considerado fechado, mas em escalas regionais e locais as bacias hidrográficas constituem sistemas abertos, com entradas e saídas de água bem definidas, o que justifica seu uso como unidade básica de estudo em hidrologia.

Figura 1 - Esquema do Ciclo Hidrológico.



Fonte: USGS (2017)

3.2 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica configura-se como principal unidade de análise em estudos hidrológicos por constituir um sistema natural de captação e escoamento das águas pluviais, conduzidas até um ponto de saída comum, conhecido como exutório. Esse espaço geográfico é delimitado por divisores de água, sendo composto por vertentes que direcionam o fluxo

hídrico e por uma rede de drenagem integrada, formada por cursos d'água que convergem gradualmente até o leito principal (Tucci, 2007).

Segundo Oliveira (2017), as bacias hidrográficas apresentam um conjunto de elementos físicos e ambientais, como características fisiográficas, tipo e estrutura do solo, relevo, litologia, clima, cobertura vegetal, uso e ocupação do solo, além dos regimes de chuvas e vazões, fatores que interferem na dinâmica e disponibilidade de água ao longo da bacia.

Ao se interpretar a bacia hidrográfica como um sistema físico, observa-se que sua entrada se dá pela precipitação, enquanto a saída corresponde ao volume de água que escoar pelo exutório. No entanto, parte dessa água é perdida por processos como a evaporação, a transpiração da vegetação e a infiltração no solo. O funcionamento hidrológico de uma bacia está intimamente ligado às suas propriedades físicas e morfológicas, como sua forma, extensão, constituição geológica, arranjo da rede de drenagem, além do tipo de solo e da forma como o território é utilizado. Esses fatores condicionam fenômenos como a infiltração da água, os padrões de escoamento superficial e subterrâneo, a evapotranspiração e o volume de deflúvio gerado (Tonello, 2005).

3.3 Geoprocessamento e a Gestão dos Recursos Hídricos

As bacias hidrográficas constituem unidades naturais adequadas à análise e ao planejamento dos recursos hídricos, pois seus limites físicos, definidos pelos divisores topográficos, permitem integrar em um mesmo recorte espacial as interações entre relevo, solos, uso e cobertura da terra e a organização da rede de drenagem. Essa condição favorece diagnósticos ambientais, a avaliação de impactos e a definição de estratégias de manejo e conservação em escala de bacia (Botelho, 1999).

Nesse contexto, o uso de geotecnologias, em especial o geoprocessamento, torna-se fundamental para a elaboração de mapas temáticos, a integração de bancos de dados georreferenciados e a análise espacial das condições físicas e de uso do solo nas bacias hidrográficas (Santana, 2017). A representação e a análise em ambiente digital favorecem a compreensão da distribuição dos recursos naturais e subsidiam ações de planejamento voltadas à proteção e ao uso racional da água.

3.3.1 Importância do geoprocessamento na hidrologia

A hidrologia é a ciência que abrange a ocorrência, a distribuição, o movimento e as propriedades das águas da Terra e sua relação com o ambiente ao longo das diferentes fases

do ciclo hidrológico (United States Geological Survey, 2019). Em função da importância da água para o desenvolvimento socioeconômico, a análise dos processos hidrológicos requer ferramentas capazes de representar, de forma integrada, as variações espaciais e temporais das variáveis envolvidas.

Nesse cenário, o geoprocessamento destaca-se como uma tecnologia essencial para a hidrologia aplicada, pois permite integrar, visualizar e analisar dados georreferenciados de diferentes fontes, como MDE, geologia, solos, uso e cobertura da terra e redes de monitoramento hidrometeorológico (Zaidan, 2017). A utilização dessas ferramentas facilita a delimitação de bacias de contribuição, a extração de parâmetros fisiográficos, o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações ou secas e o suporte à tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos.

3.3.2 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) constituem um conjunto de ferramentas computacionais voltadas ao armazenamento, manipulação, análise e representação de dados georreferenciados, permitindo integrar informações de diferentes fontes em um mesmo ambiente digital e representar com precisão a localização de elementos do mundo real, bem como realizar análises espaciais sobre esses dados (Câmara; Davis, 2001).

A estrutura funcional de um SIG compreende rotinas de entrada e edição de dados, organização em bancos de dados, processamento gráfico e de imagens, além de recursos para geração de mapas e relatórios (Spring, 2006). Essas características explicam seu uso recorrente em estudos ambientais e de recursos hídricos, ao viabilizar operações espaciais, análises quantitativas e a integração entre camadas temáticas, oferecendo suporte à tomada de decisão na gestão territorial (Hamada; Gonçalves, 2007). No presente estudo, utilizou-se o QGIS, um software livre e de código aberto amplamente empregado em geociências, com capacidade de manipular dados vetoriais e raster e de integração com ferramentas como o GRASS GIS (Silva, 2017).

3.4 Modelo Digital de Elevação (MDE)

São representações tridimensionais da superfície terrestre, que fornecem informações sobre altitude, declividade e orientação do terreno. MDE hidrologicamente consistentes são cruciais para a delimitação precisa de bacias e para a análise do escoamento superficial. Existem diferentes tipos de MDEs, como o Modelo Digital do Terreno (MDT) e o

Modelo Digital de Superfície (MDS), cada um com suas particularidades e aplicações. Pode-se obter MDE a partir de imagens de satélite com limite de resolução; quanto menor o tamanho do pixel (maior resolução espacial), mais representativo será o modelo, embora isso demande melhores equipamentos e maior capacidade de processamento (Silveira, 2000).

A delimitação de bacias hidrográficas utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE) em formato raster exige, como etapa inicial, a definição apropriada do tamanho das células (pixels). Essa escolha deve ser compatível com a escala da área analisada e com os objetivos do estudo, pois influencia diretamente a resolução e a precisão dos resultados. Marcellini (2002), ao discutir orientações do U.S. Geological Survey, ressalta que o dimensionamento dos pixels pode ser balizado pela escala cartográfica, buscando um equilíbrio entre detalhamento geométrico e custo computacional. O Quadro 1 apresenta o tamanho de células para o MDE, de acordo com a USGS.

Quadro 1 - Tamanhos de células para o MDE, segundo USGS.

Escala do Mapa	Tamanho da célula	Utilização
1:24.000	30 m	Áreas urbanas, pequenas bacias hidrográficas
1:100.000	60 m	Pequenas a médias bacias hidrográficas
1:250.000	100 m	Grandes bacias hidrográficas
1:1.000.000	1000 m	Escala global e continental

Fonte: Adaptado de USGS

Durante esse processo, o MDE permite a geração de variáveis hidrológicas essenciais, como a direção e o acúmulo de fluxo. A direção de fluxo é determinada a partir da célula central, apontando para qual célula adjacente o escoamento tende a seguir, considerando a declividade entre elas. Com base nisso, o acúmulo de fluxo representa a quantidade de células contribuintes que direcionam o escoamento para uma célula específica, caracterizando assim o padrão de drenagem da bacia.

3.5 Estações Fluviométricas

A escassez de dados hidrológicos, particularmente de séries históricas de vazão, ainda é uma limitação recorrente no Brasil, reflexo da recente atenção do setor público à gestão dos recursos hídricos e dos custos elevados para implantação e manutenção de estações de monitoramento. Essa ausência de dados confiáveis e bem distribuídos no tempo e no

espaço compromete significativamente a estimativa da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas.

Nesse contexto, torna-se necessário priorizar estudos hidrológicos que aproveitem ao máximo as informações fluviométricas já existentes e, de forma complementar aos processos de outorga, implementar medidas técnicas voltadas à redução ou, idealmente, à eliminação dessa lacuna informacional (Silveira et al., 1998).

Assim, conforme apontado por Tucci (2007), as estações fluviométricas demonstram papel estratégico na quantificação das vazões dos cursos d'água, sendo essenciais para análises hidrológicas, planejamento da gestão hídrica e avaliação de eventos extremos, como enchentes e períodos de estiagem.

3.6 Caracterização Fisiográfica

A caracterização fisiográfica de uma bacia hidrográfica refere-se ao processo de mensurar e descrever seus atributos físicos, morfométricos e geológicos, os quais são essenciais para interpretar o seu comportamento hidrológico. Variáveis como área, forma, relevo, configuração da rede de drenagem e tipo de solo influenciam diretamente a forma como a bacia responde à precipitação, condicionando tanto o volume gerado quanto o tempo de concentração do escoamento superficial (Tucci, 2007). Segundo Villela e Mattos (1975), a análise desses parâmetros permite inferir sobre a capacidade de armazenamento de água, a velocidade de resposta a eventos de chuva e a susceptibilidade a picos de cheia, sendo uma etapa indispensável em estudos de planejamento e gestão de recursos hídricos.

3.6.1 Área de Drenagem e Perímetro

De acordo com Villela e Mattos (1975), a área de drenagem corresponde à superfície da bacia hidrográfica responsável por captar e conduzir o escoamento até o exutório, sendo expressa em quilômetros quadrados (km²) e representando a extensão efetivamente drenada pela rede hidrográfica. Já o perímetro é o comprimento do contorno que delimita a bacia, normalmente expresso em quilômetros (km), e ambos constituem características geométricas fundamentais para a determinação e a análise de parâmetros fisiográficos.

3.6.2 Comprimento total dos cursos d'água e Rio Principal

O rio principal pode ser entendido como o trecho de drenagem que representa o maior percurso que a água pode realizar dentro da bacia até alcançar o exutório. Já o

comprimento total dos cursos d'água (L_t) corresponde à soma dos comprimentos de todos os segmentos de rios que compõem a rede de drenagem da bacia. Ambos são parâmetros geralmente expressos em quilômetros (km) e desempenham papel importante na caracterização fisiográfica. Conforme destacam Collischonn e Dornelles (2013), o tempo de deslocamento da água em um rio depende da velocidade do escoamento e do trajeto a ser percorrido; assim, o caminho realizado pela água da precipitação desde o ponto onde se forma o escoamento até o exutório é o que determina essa distância.

3.6.3 Densidade de drenagem (D_d)

A densidade de drenagem (D_d) é definida pela razão entre o comprimento total dos cursos d'água (L_t) e a área total da bacia (A), conforme demonstrado na Equação 1.

$$D_d = \frac{L_t}{A}, \text{ onde} \quad (1)$$

D_d = Densidade de drenagem (km/km²);

L_t = Comprimento total dos cursos d'água (km);

A = Área da bacia (km²).

Segundo Christofletti (1980), o cálculo da densidade de drenagem é essencial na análise hidrológica devido à sua correlação inversa com o comprimento dos rios. Isso significa que, à medida que o valor da densidade aumenta, ocorre uma diminuição proporcional no tamanho dos elementos fluviais que compõem a bacia.

Este índice está relacionado com características geológicas, sendo que as bacias hidrográficas que possuem solos rochosos, que dificultam a infiltração, possuem maior potencial de gerar escoamento superficial, formando maior número de rios perenes e consequentemente maior densidade de drenagem.

3.6.4 Coeficiente de compacidade (K_c)

É a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área equivalente à da bacia. Um valor menor de K_c indica uma bacia mais próxima de um círculo, o que pode influenciar a tendência a enchentes. O K_c foi determinado baseado na equação 2.

$$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}, \text{ onde} \quad (2)$$

K_c = coeficiente de compacidade (adimensional);

P = perímetro da bacia (km);

A = Área da bacia (km²).

3.6.5 Índice de circularidade (Ic)

Esse parâmetro mede a tendência da bacia a ter um formato mais circular ou alongado, é expresso através da equação 3.

$$Ic = \frac{12,57 \times A}{P^2} \quad , \text{ onde} \quad (3)$$

IC = Índice de circularidade (adimensional);

A = Área da bacia (km²);

P = Perímetro da bacia (km).

Quanto mais próximo de 1 for o valor do índice de circularidade (IC), mais a bacia tende a apresentar formato circular e, em geral, resposta hidrológica mais rápida, o que a torna mais suscetível a picos de vazão e enchentes. A forma da bacia pode ser classificada de acordo com faixas de IC, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos Índices de Circularidades.

Classe	Limites
Forma alongada	0,36 - 0,50
Forma intermediária	0,51 - 0,75
Forma circular	0,76 - 1,00

Fonte: Silva (2012)

3.6.6 Declividade média da bacia (Decliv)

A declividade média da bacia, podendo ser expressa em graus (°) ou porcentagem (%), é um parâmetro que indica a inclinação geral do terreno na área de drenagem. Declividades mais elevadas tendem a aumentar a componente gravitacional do escoamento, reduzindo o tempo de concentração e elevando a velocidade média da água, o que, em geral, diminui as oportunidades de infiltração e aumenta o potencial de erosão hídrica (Villela; Mattos, 1975; Tucci, 2007). Dessa forma, bacias mais íngremes tendem a apresentar resposta hidrológica mais rápida e maior energia erosiva, podendo gerar picos de cheia mais acentuados para um mesmo evento de precipitação.

3.6.7 Capacidade de Armazenamento do Solo (CAD)

O solo desempenha um papel crucial no ciclo hidrológico, atuando como um filtro, reservatório e regulador do fluxo de água. Ele influencia a infiltração da água da chuva, o armazenamento de água subterrânea, o escoamento superficial e a evapotranspiração, afetando diretamente a disponibilidade e qualidade da água. O compartimento solo das superfícies continentais representa uma relevante variável ambiental hidrológica, principalmente no que diz respeito às interações superfície-atmosfera bem como às trocas de água e de energia entre as mesmas (Teixeira, 2010).

Nesse contexto, a capacidade de armazenamento de água no Solo (CAD) é uma das variáveis mais críticas para o entendimento da dinâmica hídrica de uma bacia hidrográfica. De acordo com Tucci (2007), solos com elevada capacidade de armazenamento atuam como reservatórios naturais, prevenindo inundações e reduzindo a erosão hídrica devido a sua característica de absorver um volume significativo de água.

3.6.8 Curve Number (CN)

O escoamento superficial é um parâmetro hidrológico crucial para mensurar os recursos hídricos. Ele representa a fase do ciclo hidrológico em que a água se move sobre a superfície terrestre, fluindo em direção ao vale da bacia hidrográfica. Quando ocorre a precipitação, uma parte da água é inicialmente retida pela vegetação ou por outros obstáculos. Da porção que atinge o solo, uma parte se infiltra, contribuindo para a evapotranspiração das plantas por meio de suas raízes ou para a recarga dos aquíferos. A porção restante da água, dependendo da capacidade de infiltração da superfície e da inclinação do terreno, escoam superficialmente (Barbosa Júnior, 2022).

O *Curve Number* (CN) é uma técnica usada para estimar o volume de escoamento em bacias hidrográficas, desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solos (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Cunha et al. (2015) destacam que o método do CN, é largamente utilizado na estimativa do escoamento superficial em bacias hidrográficas não monitoradas. De acordo com Odreski (2010) o CN é um parâmetro que relaciona as características geofísicas com o uso e ocupação do solo, com o intuito de quantificar o escoamento superficial da água em bacias hidrográficas, dado um evento pluviométrico, o modelo Chuva-Vazão. Variando de 0 a 100, um CN 0 indica uma bacia com condutividade hidráulica infinitamente alta, enquanto um CN de 100 representa uma bacia

completamente impermeável, porém, é importante ressaltar que o CN não expressa a proporção exata de áreas impermeáveis na bacia.

3.6.9 Percentual da bacia sobre solo cristalino (Crist)

Refere-se à proporção da área da bacia hidrográfica que é composta por rochas cristalinas, como granitos e gnaisses. As características fisiográficas, que incluem a geologia, a pedologia, a topografia e a cobertura vegetal, governam a resposta da bacia a um evento de precipitação (Tucci, 2007). Bacias hidrográficas que possuem solos rochosos, que dificultam a infiltração, possuem maior potencial de gerar escoamento superficial, formando maior número de rios perenes e conseqüentemente maior densidade de drenagem.

3.7 Análise Estatística Multivariada

A análise estatística multivariada compreende um conjunto de técnicas destinadas ao tratamento simultâneo de múltiplas variáveis, buscando identificar padrões, relações e estruturas subjacentes em conjuntos de dados de maior complexidade. Diferentemente dos métodos univariados e bivariados, a abordagem multivariada considera explicitamente a correlação entre as variáveis, permitindo uma visão mais integrada dos fenômenos estudados (Johnson; Wichern, 2007; Hair et al., 2009).

Segundo Hair et al. (2009), as técnicas multivariadas podem ser organizadas em função do objetivo principal da análise, incluindo métodos voltados à redução de dimensionalidade, à exploração e identificação de grupos naturais, à classificação supervisionada e à modelagem de relações entre conjuntos de variáveis. No contexto de estudos de bacias hidrográficas, essas técnicas têm sido amplamente empregadas para sintetizar conjuntos de parâmetros fisiográficos, identificar gradientes ambientais e propor tipologias de bacias com comportamentos físicos e hidrológicos semelhantes.

De modo geral, a aplicação de métodos multivariados envolve etapas como: (i) seleção e padronização das variáveis; (ii) verificação de correlações e possíveis redundâncias; (iii) escolha das técnicas apropriadas aos objetivos do estudo; e (iv) interpretação dos resultados à luz do conhecimento físico do sistema analisado (Hair et al., 2009; Johnson; Wichern, 2007).

3.7.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma das técnicas mais utilizadas para redução de dimensionalidade em conjuntos de dados multivariados. Seu propósito é

transformar um conjunto original de variáveis, possivelmente correlacionadas entre si, em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais, obtidas como combinações lineares das variáveis originais (Jolliffe, 2002; Johnson; Wichern, 2007).

A PCA tem sido amplamente empregada em estudos aplicados que buscam condensar conjuntos extensos de variáveis correlacionadas em poucos eixos interpretáveis. Em aplicações recentes voltadas à identificação de bacias hidrologicamente homogêneas, a técnica tem sido utilizada para reduzir a dimensionalidade e reorganizar a variância em componentes ortogonais, preservando os principais gradientes de variação do conjunto original e favorecendo a interpretação física dos padrões (Mihret et al., 2024). Assim, a PCA desempenha papel central como etapa preliminar à aplicação de métodos de agrupamento, ao minimizar redundâncias e tornar mais clara a estrutura subjacente aos dados.

Cada componente principal é obtido de forma a maximizar a variância explicada, sujeita à restrição de ortogonalidade em relação aos componentes anteriores. O primeiro componente principal (PC1) concentra a maior parcela possível da variância total; o segundo componente (PC2) explica a maior variância remanescente, e assim sucessivamente. Em muitos casos práticos, poucos componentes são suficientes para representar a maior parte da variabilidade do conjunto original, permitindo uma descrição mais simples e interpretável do sistema (Jolliffe, 2002; Hair et al., 2009).

A construção da PCA baseia-se na matriz de covariâncias ou de correlações entre as variáveis. A decomposição espectral dessa matriz fornece autovalores e autovetores, associados, respectivamente, à variância explicada por cada componente e às cargas fatoriais (loadings), que representam o peso de cada variável original em cada componente principal (Johnson; Wichern, 2007). A interpretação física dos componentes decorre diretamente da análise dessas cargas, permitindo caracterizá-los como gradientes fisiográficos dominantes.

Os escores dos componentes principais correspondem às coordenadas de cada observação no espaço definido pelos componentes retidos. Essa representação de menor dimensão facilita a visualização de padrões, a identificação de grupos de unidades semelhantes e a detecção de possíveis outliers (Hair et al., 2009; Jolliffe, 2002).

Em estudos hidrológicos e ambientais, a PCA tem sido empregada com frequência para sintetizar conjuntos de variáveis morfométricas, geológicas, de solos e de uso e cobertura da terra, permitindo identificar os principais eixos de variação fisiográfica entre bacias e apoiar processos de regionalização e classificação de unidades de drenagem.

3.7.2 *Análise de agrupamento*

A análise de agrupamento, ou *cluster analysis*, constitui um conjunto de técnicas exploratórias cujo objetivo é organizar um conjunto de objetos em grupos internamente homogêneos e externamente heterogêneos, com base em um conjunto de variáveis descritivas (Johnson; Wichern, 2007; Hair et al., 2009). Diferentemente dos métodos de classificação supervisionada, a análise de agrupamento não parte de rótulos previamente definidos, buscando identificar estruturas latentes ou “grupos naturais” presentes nos dados.

De modo geral, os procedimentos de agrupamento classificam-se em métodos hierárquicos e métodos de partição. Nos métodos hierárquicos, constrói-se uma estrutura em forma de árvore que representa sucessivas fusões entre observações, permitindo visualizar padrões de similaridade em diferentes níveis (Everitt et al., 2011). Entre esses métodos, destaca-se o algoritmo de Ward, que procura formar grupos minimizando a variância interna a cada etapa de fusão (Ward, 1963). A interpretação conjunta do dendrograma e das medidas de heterogeneidade associadas fornece subsídios para sugerir um número adequado de grupos (Kaufman; Rousseeuw, 1990).

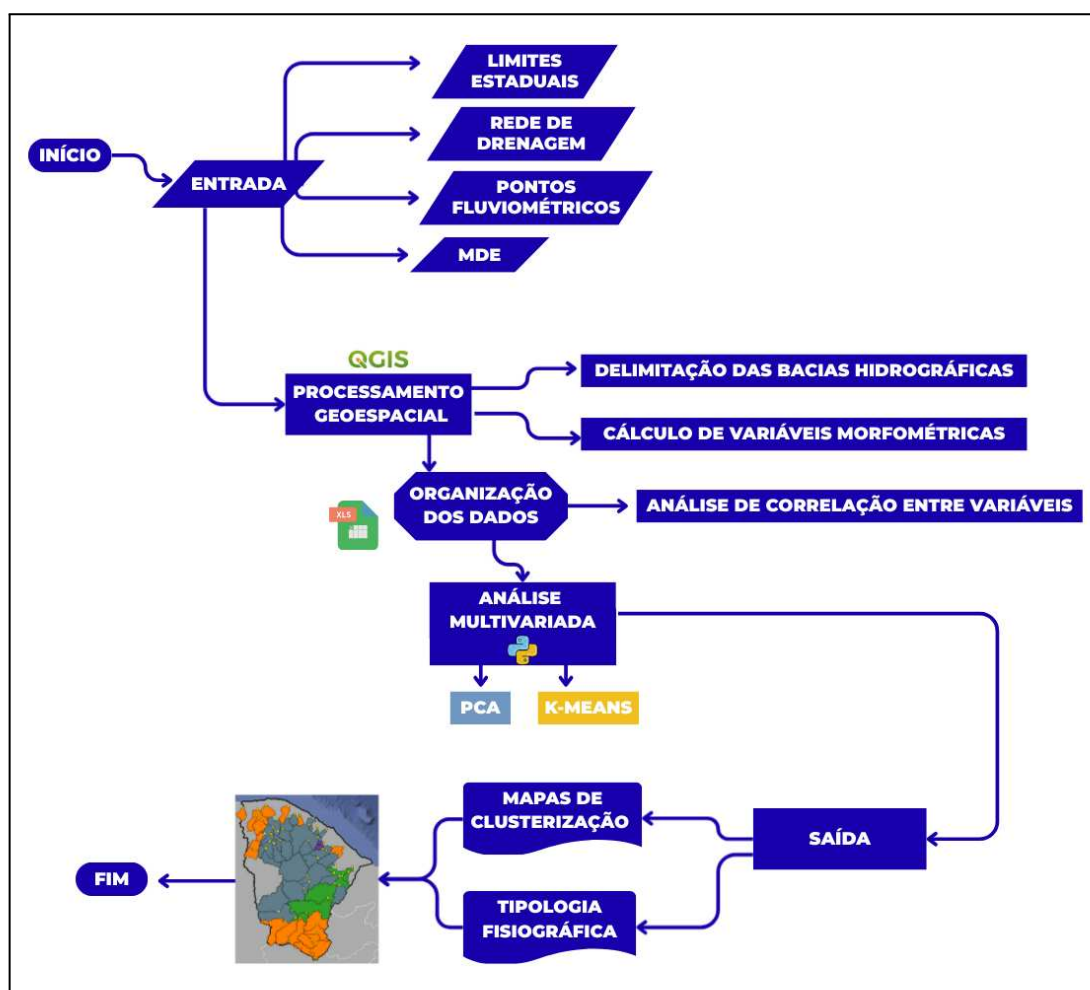
Nos métodos de partição, como o algoritmo K-means, assume-se previamente um número K de grupos, e o objetivo é particionar as observações de modo a minimizar a soma das distâncias quadráticas entre cada unidade e o centróide do cluster ao qual foi atribuída (Hair et al., 2009). Trata-se de um procedimento iterativo, baseado em sucessivas realocações até que um critério de convergência seja atendido. A definição de K é um aspecto central da análise, e pode ser apoiada por critérios de validade interna, como o índice silhouette, que combina informações de coesão e separação entre clusters (Kaufman; Rousseeuw, 1990; Everitt et al., 2011).

A literatura recente tem reforçado a utilidade do algoritmo K-means em situações nas quais se deseja identificar subconjuntos relativamente homogêneos em conjuntos multivariados complexos. Em abordagens de regionalização hidrológica baseadas em tipologias, o método tem sido aplicado para particionar unidades territoriais ou bacias em grupos interpretáveis, frequentemente em conjunto com etapas de síntese multivariada, o que contribui para a coerência física e espacial dos agrupamentos (Rami et al., 2022). Nessa perspectiva, a minimização da variabilidade intra-grupo e a maximização da separação entre centróides permanecem princípios centrais, especialmente quando se busca definir tipologias a partir de gradientes fisiográficos sintetizados por técnicas como a PCA.

4. METODOLOGIA

O encadeamento das etapas descritas neste capítulo é sintetizado no fluxograma apresentado na figura 2, o qual organiza visualmente o percurso adotado desde a obtenção dos dados até a interpretação físico-hidrológica dos resultados.

Figura 2 - Fluxograma da Metodologia utilizada.



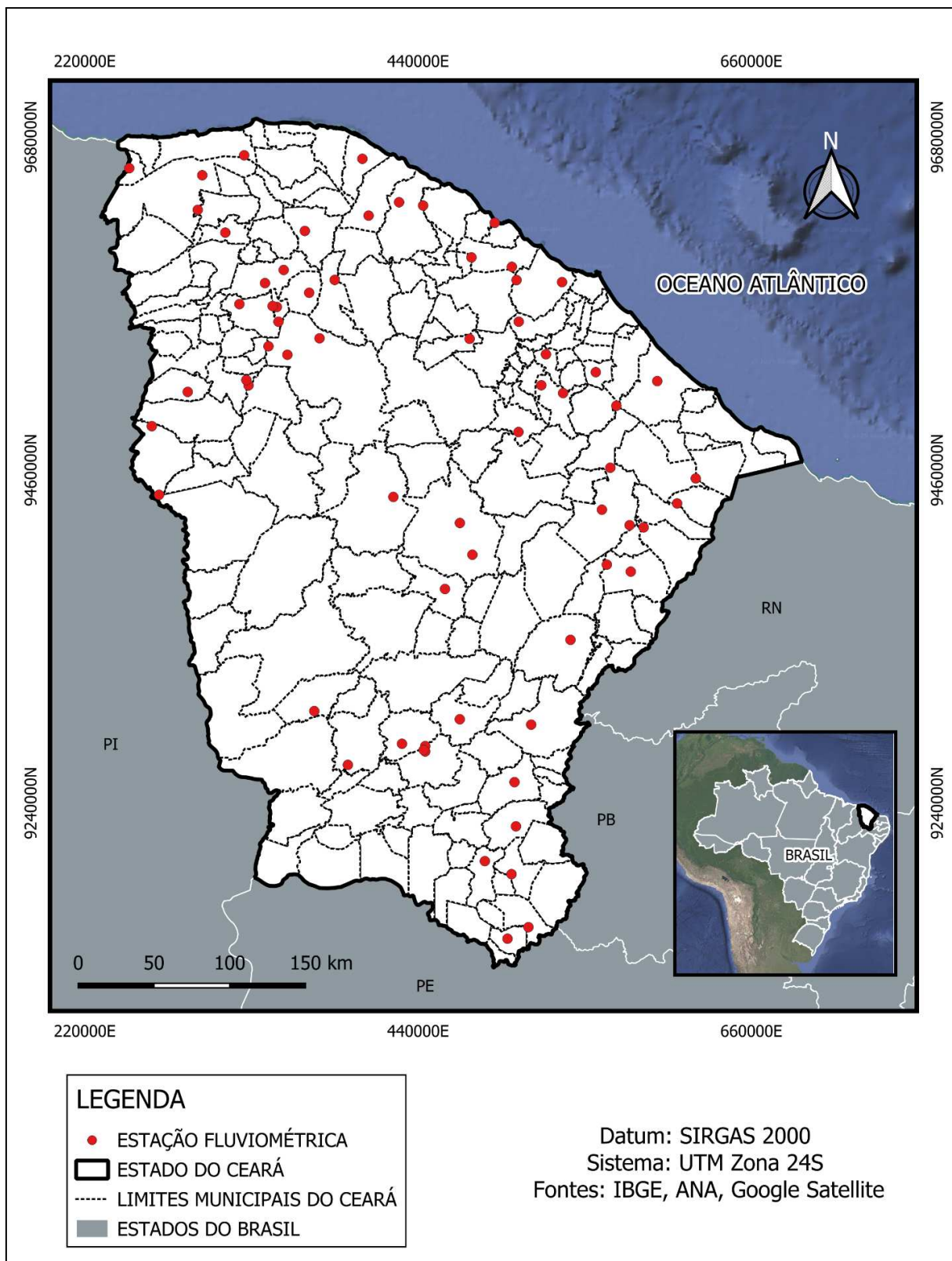
Fonte: Autor (2025)

4.1 Área de estudo

A área de estudo compreende as bacias de contribuição das estações fluviométricas localizadas no estado do Ceará, que constituem as unidades de análise deste trabalho. O estado situa-se na região Nordeste do Brasil e apresenta contraste entre domínios de embasamento cristalino e bacias sedimentares, resultando em variações de relevo, solos, uso e ocupação do solo e regime de escoamento. A rede fluviométrica é composta por 67 estações, porém 63 foram selecionadas para análise, em função da disponibilidade e qualidade das séries de dados. As estações consideradas definem os pontos de exutório a partir dos quais

as bacias são delimitadas e caracterizadas fisiograficamente. A figura 3 apresenta o mapa com a localização das estações fluviométricas.

Figura 3 - Mapa de localização das Estações Fluviométricas.



4.2 Base de dados

Foram utilizados dados vetoriais e matriciais obtidos de instituições oficiais e bases temáticas previamente consolidadas, todos integrados em ambiente SIG. As principais camadas empregadas no estudo estão sintetizadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Principais bases de dados utilizadas no estudo.

Tema / Dado	Fonte / Produto	Tipo	Escala / Resolução	Uso no estudo
Modelo Digital de Elevação (MDE)	MDE hidrológico ANADEM	Raster	30 m	Base altimétrica para correção hidrológica e delimitação das bacias
Limite do estado do Ceará	IBGE – malha territorial	Vetorial	1:250.000	Delimitação da área de estudo
Limites dos estados do Brasil	IBGE – malha territorial	Vetorial	1:250.000	Contextualização regional no mapa de localização
Rede de drenagem	SUDENE	Vetorial	1:100.000	Representação da hidrografia e apoio à análise morfométrica
Curve Number (CN)	ANA – SINGREH	Vetorial	1:250.000	Cálculo do CN médio por bacia
Capacidade de Armazenamento de Água (CAD)	ANA – SINGREH	Vetorial	1:250.000	Estimativa da CAD média por bacia
Domínio cristalino / sedimentar	CPRM	Vetorial	1:250.0000	Percentual de área em embasamento cristalino por bacia

Fonte: Autor (2025)

4.3 Ferramentas e ambientes computacionais

Foram utilizados os seguintes softwares livres e ambientes de programação ao longo do estudo

- QGIS Desktop 3.42.2 – empregado no processamento geoespacial, manipulação das camadas vetoriais e matriciais, delimitação das bacias de contribuição e elaboração dos mapas temáticos.
- GRASS GIS 8.4.1 – utilizado de forma integrada ao QGIS na execução dos algoritmos de correção hidrológica do MDE e delineamento das bacias (r.fill.dir, r.watershed, r.water.outlet e r.to.vect).

- Linguagem Python 3 – aplicada no tratamento das tabelas de atributos e na realização das análises estatísticas multivariadas, com uso de bibliotecas como Pandas, NumPy, SciPy, Scikit-learn e Matplotlib.
- Microsoft Excel – utilizado para organização, conferência e inspeção preliminar das séries de dados e das tabelas derivadas.

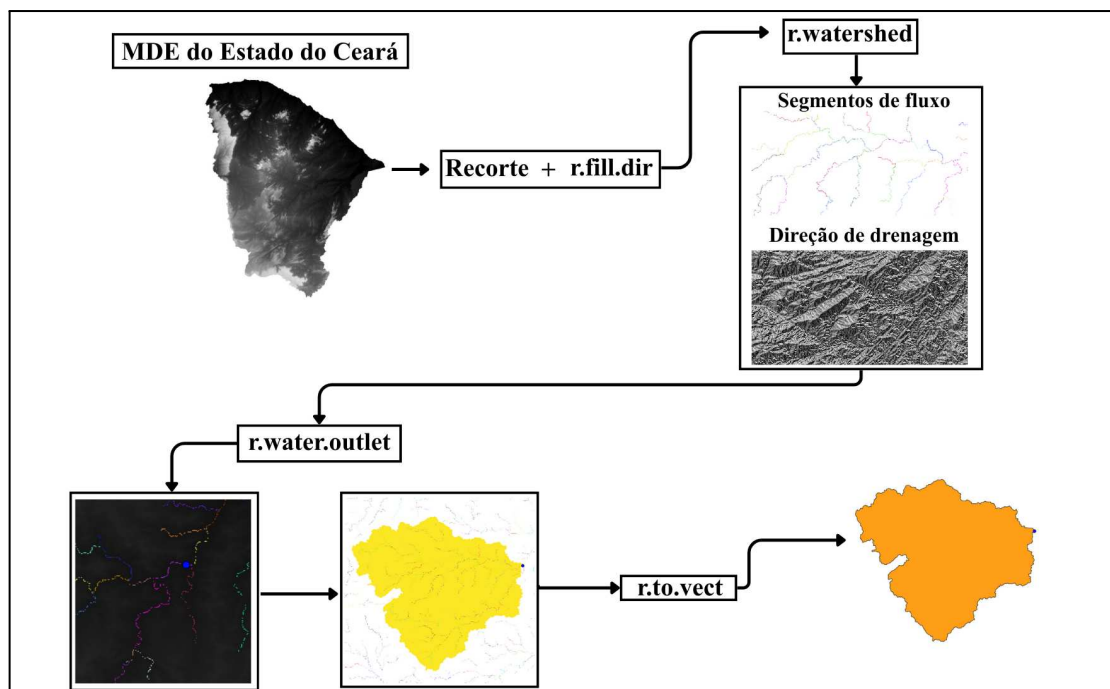
4.4 Delimitação das Bacias Hidrográficas

Após a seleção das estações fluviométricas, foi realizada a caracterização das bacias de contribuição correspondentes à área de drenagem de cada estação. Nessa etapa, procedeu-se à delimitação do traçado das bacias, à determinação de suas áreas. A definição dessas características foi efetuada por meio do software de geoprocessamento QGIS 3.42, com apoio do Google Earth para conferência visual e apoio na localização.

O procedimento de delimitação das bacias de contribuição foi sistematizado no fluxograma apresentado na Figura 4, que resume as principais etapas executadas em ambiente QGIS a partir do MDE do estado do Ceará e das coordenadas das estações fluviométricas. Inicialmente, o MDE é recortado para facilitar o processo, gerando a base altimétrica utilizada nas etapas seguintes. Em seguida, realiza-se a correção hidrológica do modelo, com o preenchimento de depressões espúrias e a imposição de um escoamento direcionado sobre a superfície, de modo a obter um MDE hidrológicamente consistente.

A partir desse MDE corrigido, são calculadas a direção e a acumulação de fluxo, resultando em uma representação contínua da rede de drenagem. As coordenadas das estações fluviométricas são então ajustadas à rede derivada do MDE e utilizadas como exutórios no algoritmo de delimitação, que gera, para cada estação, a respectiva bacia de contribuição em formato raster. Na etapa final, os polígonos de bacia são convertidos para o formato vetorial e submetidos a verificação topológica, produzindo o conjunto de bacias de contribuição utilizado nas análises fisiográficas e estatísticas subsequentes.

Figura 4 - Etapas de delimitação das bacias de contribuição das estações fluviométricas.



Fonte: Autor (2025)

Em seguida, foi realizada a caracterização fisiográfica das bacias, com a identificação de seus principais aspectos físicos e morfométricos.

4.5 Cálculo dos Parâmetros fisiográficos

Com as bacias delimitadas, o QGIS foi empregado para o cálculo e a extração dos parâmetros fisiográficos necessários à tipologia. Por meio de ferramentas de análise espacial, foram quantificados atributos morfométricos essenciais, tais como:

- Área
- Perímetro
- Comprimento total dos cursos d'água (Lt)
- Densidade de drenagem (Dd)
- Índice de circularidade (Ic)
- Coeficiente de compacidade (Kc)

Adicionalmente, foram extraídos valores médios ou percentuais para parâmetros que refletem as características de uso e ocupação do solo e geologia, incluindo:

- *Curve Number* (CN)
- Capacidade de Armazenamento de Água (CAD)
- Declividade média (Decliv)

- Área em embasamento cristalino (Crist)

A consolidação dessas informações permitiu a caracterização completa das bacias, fornecendo a base de dados para a subsequente Análise de Agrupamento.

4.6 Análise exploratória e correlação entre variáveis

Antes da aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA), foi realizada uma análise exploratória das variáveis fisiográficas, incluindo estatísticas descritivas e a avaliação das correlações lineares entre os parâmetros. As correlações de Pearson foram calculadas para o conjunto das dez variáveis, com o objetivo de identificar associações fortes, possíveis redundâncias e grupos de variáveis que expressassem controles semelhantes. Essas informações foram utilizadas para apoiar a interpretação posterior dos componentes principais e para discutir a influência relativa dos parâmetros de escala, forma, litologia, solos e uso e cobertura da terra na organização das bacias. A matriz de correlação completa é apresentada no capítulo de resultados.

Com base nessa matriz de correlação e seguindo recomendações usuais para mitigação de multicolinearidade em análises multivariadas, definiu-se como conjunto de trabalho as sete variáveis menos redundantes: área de drenagem, percentual de área cristalina (Crist), índice de circularidade (I_c), densidade de drenagem (Dd), capacidade de armazenamento de água no solo (CAD), declividade média (Decliv) e Curve Number (CN). Essas variáveis foram utilizadas tanto na Análise de Componentes Principais quanto na análise de agrupamento por K-means, sendo os resultados detalhados no Capítulo 5.

4.7 Procedimentos de análise estatística multivariada

A análise estatística multivariada foi implementada em linguagem Python 3, utilizando as bibliotecas pandas, numpy, scikit-learn, scipy e matplotlib. Todo o processamento foi estruturado em um único script, de forma a garantir a reprodutibilidade das etapas de tratamento dos dados, aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) e dos métodos de agrupamento.

4.7.1 Pré-processamento e padronização dos dados

O arquivo de entrada, em formato CSV, continha as 63 bacias de contribuição e as variáveis fisiográficas selecionadas para o estudo. A leitura e organização inicial dos dados foram realizadas com a biblioteca pandas.

Em seguida, as variáveis contínuas foram padronizadas pelo método do z-score, por meio da classe `StandardScaler` da biblioteca `scikit-learn`, de forma que cada variável passasse a apresentar média zero e desvio-padrão unitário. Essa etapa teve como objetivo eliminar o efeito de diferenças de escala entre os atributos antes da aplicação da PCA e dos métodos de agrupamento.

4.7.2 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada sobre a matriz de dados padronizados utilizando a classe `PCA` da biblioteca `scikit-learn`. A partir desse procedimento foram obtidos os autovalores, a porcentagem de variância explicada por cada componente, a variância acumulada, as cargas fatoriais (loadings) e os escores dos componentes principais (PC1, PC2, PC3, etc.).

Com base nesses resultados, foram geradas automaticamente as tabelas de variância explicada e de cargas fatoriais, bem como o gráfico de sedimentação, que serviu de apoio à definição do número de componentes relevantes para interpretação e para uso na etapa de agrupamento.

4.7.3 Agrupamento (clusterização) por k-means

Para a análise de agrupamento, foram empregados dois métodos complementares. Inicialmente, realizou-se o agrupamento hierárquico utilizando a função `linkage` (método de Ward) da biblioteca `scipy`, cuja estrutura de similaridade entre as bacias foi visualizada por meio de um dendrograma. Em seguida, aplicou-se o algoritmo K-Means, implementado pela classe `KMeans` da biblioteca `scikit-learn`.

A PCA foi utilizada como etapa de redução de dimensionalidade, de modo que os escores dos componentes principais serviram de base para os agrupamentos. Foram testados três cenários de classificação, com $K = 4$, $K = 5$ e $K = 6$ clusters. Para cada cenário, o script atribuiu a cada bacia o código do cluster correspondente e armazenou os resultados em uma tabela consolidada, incluindo as colunas de rótulos de grupo e os centróides dos clusters no espaço dos componentes principais.

Os gráficos de dispersão dos clusters nos planos $PC1 \times PC2$ foram gerados automaticamente e utilizados na avaliação da separação entre os grupos. Essa rotina computacional padronizou o processamento estatístico, aumentou a reprodutibilidade das análises e facilitou a posterior integração dos resultados com o ambiente de SIG utilizado na representação cartográfica dos clusters.

4.8 Representação Cartográfica

Os resultados da clusterização foram integrados ao ambiente de SIG para representação cartográfica. A tabela gerada em Python, contendo o código de cluster associado a cada bacia de contribuição, foi importada para o QGIS e vinculada à camada vetorial das bacias por meio de junção tabular.

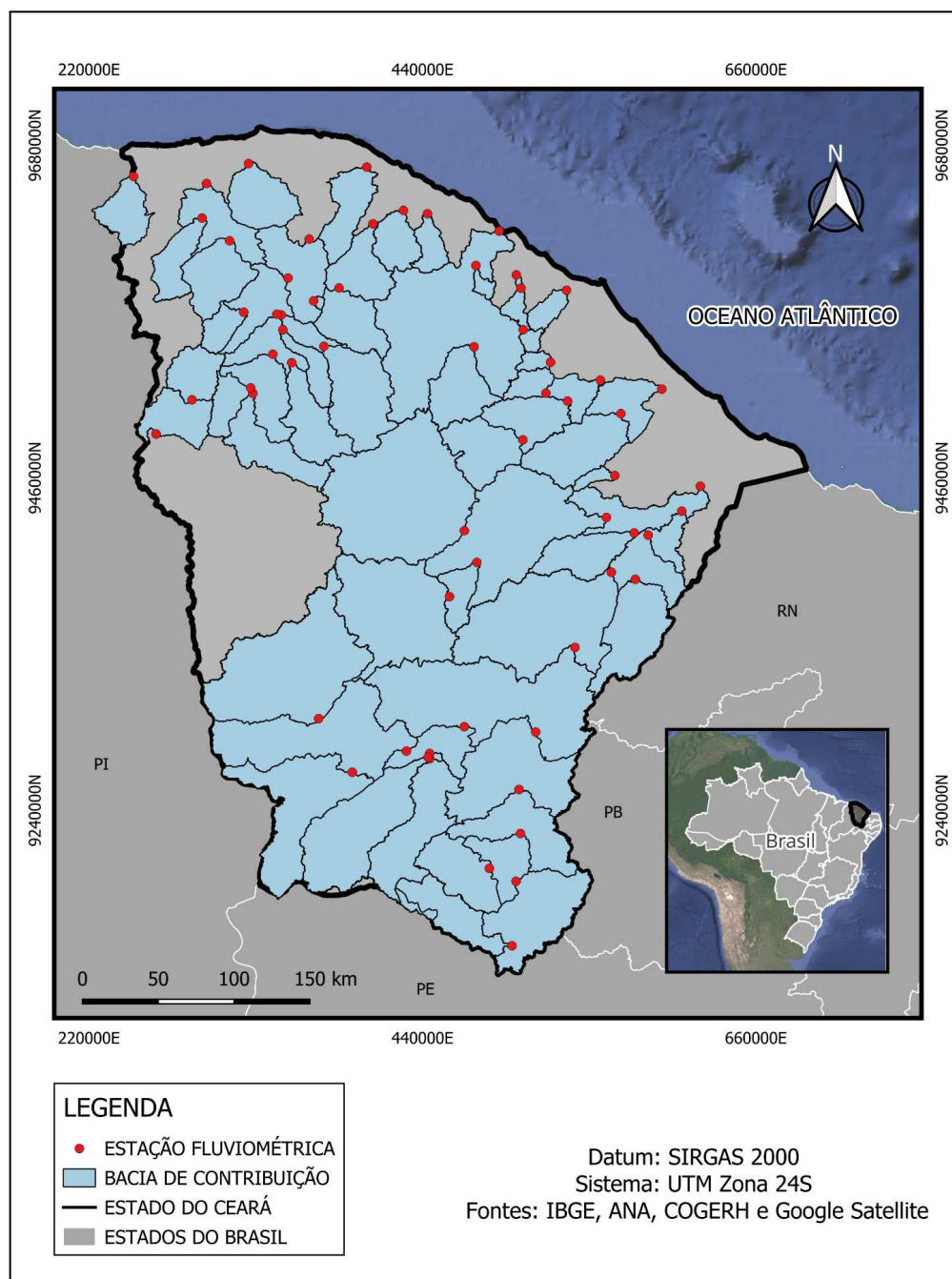
A partir dessa integração, foram elaborados mapas temáticos nos quais cada grupo de bacias foi representado por uma classe de cor distinta, permitindo a visualização da distribuição espacial dos clusters no estado do Ceará. Essa etapa viabilizou a identificação de padrões regionais de similaridade fisiográfica entre as bacias, servindo de base para a análise e discussão dos resultados no capítulo seguinte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Bacias de contribuição das estações fluviométricas

A Figura 5 apresenta o mapa das bacias de contribuição das estações fluviométricas no estado do Ceará. Observa-se a presença de bacias com ampla variação de área de drenagem, desde unidades de pequena extensão, associadas a trechos de cabeceira e escarpas, até grandes bacias regionais que integram extensas porções do território estadual.

Figura 5 - Bacias de contribuição das estações fluviométricas no estado do Ceará.



5.2 Parâmetros fisiográficos das bacias de contribuição

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis fisiográficas calculadas para as 63 bacias de contribuição. Os valores originais utilizados nas análises encontram-se no Apêndice A.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos parâmetros fisiográficos.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Quartil 1	Quartil 2	Quartil 3	Máximo
Área (km ²)	7462,1	13636,0	45,5	1016,6	2369,9	6302,5	68991,8
Perímetro (km)	608,3	593,1	39,9	236,3	402,1	678,0	2668,4
Lt (km)	6344,1	11950,1	39,1	754,2	1830,2	4899,6	61436,7
Crist	0,79	0,26	0,00	0,66	0,90	0,99	1,00
Kc	2,40	0,34	1,66	2,16	2,36	2,63	3,21
Ic	0,18	0,05	0,10	0,14	0,18	0,21	0,36
Dd (km/km ²)	0,82	0,16	0,29	0,71	0,85	0,92	1,41
CAD (mm)	74,08	11,22	56,00	66,50	73,00	80,50	113,00
Decliv (%)	9,46	4,16	2,00	8,00	9,00	10,00	29,00
CN (mm)	75,03	5,86	63,00	71,00	76,00	78,00	85,00

Lt - Comprimento total dos cursos d'água, Crist - Área em embasamento cristalino, Kc - Coeficiente de compacidade, Ic - Índice de circularidade, Dd - Densidade de drenagem, CAD - Capacidade de armazenamento de água, Decliv - Declividade média da bacia, CN - *Curve Number*

Fonte: Autor (2025)

Observa-se ampla variação de área de drenagem, evidenciando a coexistência de bacias de pequena extensão e de grandes bacias regionais. Os índices adimensionais, como o Coeficiente de Compacidade (Kc), o Índice de Circularidade (Ic) e a Densidade de Drenagem (Dd), mostram que, mesmo entre bacias de tamanhos distintos, há diferenças marcantes de forma e de grau de dissecação da rede de drenagem. Já o percentual de área sobre embasamento cristalino (Crist), a Capacidade de Água Disponível no solo (CAD), a Declividade média (Decliv) e o Curve Number (CN) destacam contrastes entre bacias fortemente cristalinas, de maior escoamento superficial, e bacias com valores de CN mais baixos, associadas a contextos transicionais ou sedimentares.

5.3 Correlação entre variáveis fisiográficas

A matriz de correlação de Pearson entre as variáveis fisiográficas utilizadas é apresentada na Tabela 2. De modo geral, observam-se correlações fortes apenas entre alguns parâmetros de mesma natureza, enquanto a maior parte das combinações apresenta coeficientes de correlação moderados ou baixos.

Tabela 2 - Matriz de correlação de Pearson (r).

Variáveis	Área	Perímetro	Lt	Crist	Kc	Ic	Dd	CAD	Decliv	CN
Área	1,00									
Perímetro	0,97	1,00								
Lt	1,00	0,96	1,00							
Crist	-0,02	-0,03	0,00	1,00						
Kc	0,54	0,64	0,52	0,03	1,00					
Ic	-0,45	-0,56	-0,43	-0,04	-0,96	1,00				
Dd	0,10	0,08	0,13	0,44	-0,12	0,09	1,00			
CAD	0,03	0,02	0,02	-0,04	0,10	-0,12	-0,38	1,00		
Decliv	-0,06	-0,09	-0,05	0,21	-0,10	0,05	-0,12	0,46	1,00	
CN	0,05	0,05	0,07	0,64	-0,08	0,10	0,52	-0,56	-0,38	1,00

Fonte: Autor (2025)

Entre as variáveis associadas ao tamanho das bacias, verificou-se elevada correlação linear entre área, perímetro e comprimento total dos cursos d'água, com coeficientes r superiores a 0,95. De forma semelhante, os índices de forma apresentaram forte correlação negativa entre si, com $r \approx -0,96$ entre o índice de compactidade (Kc) e o índice de circularidade (Ic). Esses resultados indicam redundância de informação nesses grupos de variáveis.

Adotando-se o critério $|r| > 0,85$ para identificação de multicolinearidade, optou-se por manter apenas uma variável de cada conjunto altamente correlacionado, estratégia de triagem frequentemente empregada para reduzir colinearidade e evitar a super-representação de um mesmo controle morfométrico em análises multivariadas (Dormann et al., 2013). Assim, a área de drenagem foi mantida como medida representativa do porte das bacias, enquanto o índice de circularidade (Ic) foi mantido como indicador de

forma, tendo sido excluídos o perímetro, o comprimento total dos cursos d'água (Lt) e o índice de compactidade (Kc) do conjunto de variáveis utilizado na análise multivariada.

O conjunto final de variáveis empregado na Análise de Componentes Principais e na análise de agrupamento passou a ser constituído por: área de drenagem, percentual de área cristalina (Crist), índice de circularidade (Ic), densidade de drenagem (Dd), capacidade de armazenamento de água no solo (CAD), declividade média (Decliv) e Curve Number (CN), reduzindo a redundância e mitigando problemas de multicolinearidade entre os atributos.

5.4 Análise de Componentes Principais (PCA)

5.4.1 Variância explicada

A Tabela 3 apresenta os autovalores e a variância explicada por cada componente principal. Observa-se que o PC1 responde por 35,07% da variância total, enquanto o PC2 e o PC3 explicam 20,93% e 20,14%, respectivamente, totalizando 76,14% de variância acumulada nos três primeiros componentes.

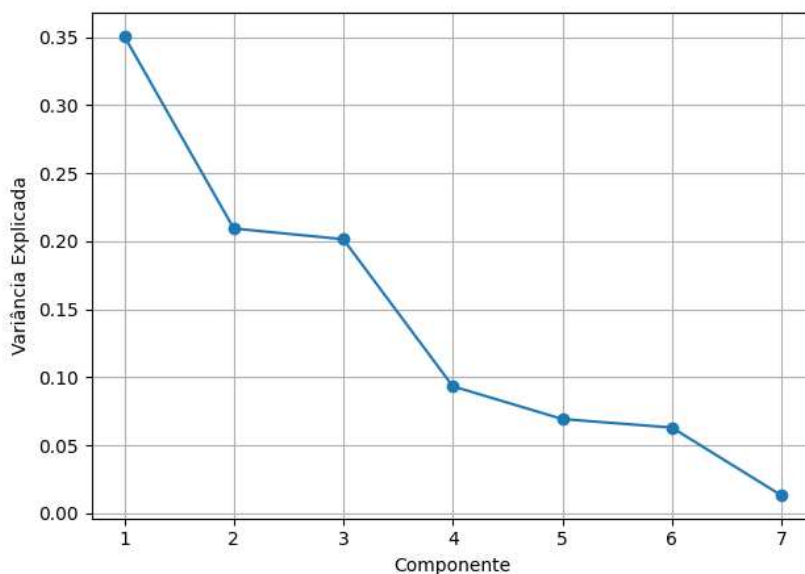
Tabela 3 - Autovalores e variância explicada dos componentes principais.

Componente	Autovalor (λ)	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	2,49	35,07	35,07
PC2	1,49	20,93	56,00
PC3	1,43	20,14	76,14
PC4	0,66	9,33	85,47
PC5	0,49	6,92	92,39
PC6	0,45	6,3	98,69
PC7	0,09	1,31	100,00

Fonte: Autor (2025)

O *scree plot* apresentado na figura 6 indica uma mudança de inclinação mais nítida a partir do quarto componente, quando a curva passa a apresentar comportamento mais achatado, sugerindo ganhos marginais progressivamente menores.

Figura 6 - Scree plot da Análise de Componentes Principais.



Fonte: Autor (2025)

Ainda assim, optou-se por reter apenas PC1–PC3, pois (i) concentram a maior parte da variabilidade com um modelo mais parcimonioso e (ii) apresentam melhor interpretabilidade fisiográfica pelas cargas fatoriais, enquanto o PC4 já possui autovalor inferior a 1 e contribuição individual < 10%.

5.4.2 Cargas fatoriais e interpretação dos componentes

As cargas fatoriais das variáveis fisiográficas nos três componentes principais retidos são apresentadas na Tabela 4. As maiores cargas em módulo indicam as variáveis que mais contribuem para cada componente, permitindo a interpretação fisiográfica dos eixos gerados pela PCA.

Tabela 4 - Cargas fatoriais das variáveis fisiográficas.

VARIÁVEL	PC1	PC2	PC3
ÁREA	0,0249	0,7005	-0,0278
Crist	0,3702	0,0507	0,6212
Ic	0,0781	-0,6997	-0,0057
Dd	0,4729	0,0401	0,1889
CAD	-0,4547	0,0839	0,3956
Decliv	-0,2827	-0,0905	0,6447
CN	0,5882	0,0206	0,0748

Fonte: Autor (2025)

No PC1, destacam-se as maiores cargas para o CN, a Dd, a CAD, o Crist e, em menor grau, a Decliv. Esse componente representa, portanto, um gradiente associado ao potencial de escoamento superficial e à rapidez de resposta hidrológica das bacias, no qual valores mais elevados de PC1 correspondem, em geral, a bacias com maior CN e Dd, maior participação de embasamento cristalino e menor capacidade de armazenamento nos solos.

O PC2 é dominado por cargas de grande magnitude para a área e o Ic. Esse componente pode ser interpretado como um eixo de porte e forma das bacias, diferenciando bacias maiores e menos circulares de bacias menores e mais compactas.

Já o PC3 apresenta maiores cargas para a declividade média, o percentual de área cristalina e a CAD, além de contribuição secundária da Dd. Esse componente sintetiza um gradiente ligado principalmente ao relevo e à litologia, no qual valores elevados indicam bacias mais íngremes, com maior participação de embasamento cristalino e solos com maior capacidade de armazenamento de água.

De forma simplificada, os três componentes principais retidos podem ser interpretados como:

- (i) um eixo associado ao potencial de escoamento superficial e às condições hidrológicas;
- (ii) um eixo de porte e forma das bacias; e
- (iii) um eixo litológico-geomorfológico, controlado por cristalinidade, declividade e capacidade de armazenamento.

Essa interpretação é compatível com aplicações de PCA combinada a técnicas de agrupamento em regionalização hidrológica, nas quais a diferenciação entre unidades envolve, simultaneamente, descritores geométricos (como superfície, perímetro e comprimentos característicos) e indicadores de resposta (por exemplo, tempo de concentração e uso do solo), ainda que, neste estudo, o gradiente de resposta esteja mais diretamente representado por CN e Dd e por controles litológicos/pedológicos (Crist e CAD) (Rami et al., 2022).

5.5 Agrupamento das bacias (K-Means)

A análise de agrupamento evidenciou que as bacias se organizam segundo dois controles principais no espaço reduzido da PCA: (i) um gradiente associado ao potencial fisiográfico de escoamento superficial versus armazenamento e (ii) um gradiente de escala/forma. Esses controles estruturam a separação entre grupos em todos os cenários

testados, com a persistência de dois conjuntos particulares: um grupo de macro-bacias associado à escala geométrica e um grupo pequeno de bacias muito íngremes, com características extremas.

De modo geral, ao aumentar K, observa-se um ganho de detalhamento pela subdivisão de conjuntos intermediários, especialmente entre bacias transicionais. Em contrapartida, o aumento de K tende a reduzir a separação média entre grupos, indicando que parte dessa subdivisão ocorre sobre gradientes contínuos.

5.5.1 Definição do número de clusters

A comparação entre as soluções com K=4, K=5 e K=6 indica que o aumento do número de clusters produz maior detalhamento, porém com redução da separação média entre grupos no espaço dos componentes principais. O índice silhouette médio foi de 0,3398 para K=4, 0,2427 para K=5 e 0,2300 para K=6, sugerindo que a partição com quatro grupos apresenta, em termos estritamente geométricos, a melhor combinação entre coesão interna e separação relativa.

Essa evidência, contudo, não é suficiente para definir a tipologia, uma vez que diferentes valores de K podem representar níveis distintos de refinamento de uma mesma estrutura multivariada. Por essa razão, a leitura das soluções foi complementada pela inspeção da estrutura hierárquica (método de Ward), apresentada juntamente com cada cenário, de modo a verificar a coerência entre os agrupamentos e as subdivisões indicadas em diferentes níveis de similaridade.

Dessa forma, os três valores de K foram mantidos para análise comparativa nas seções seguintes, nas quais se discutem, para cada solução, (i) a caracterização fisiográfica dos grupos, (ii) a separação no espaço PCA e (iii) a coerência espacial observada nos mapas. A escolha da tipologia adotada é apresentada na síntese comparativa ao final da discussão.

5.5.2 Estrutura geral dos agrupamentos no espaço dos componentes principais

Conforme discutido na Seção 5.4, o PC1 expressa um gradiente entre bacias com maior potencial fisiográfico de geração de escoamento superficial (CN, Dd e Crist mais elevados) e bacias com maior capacidade de armazenamento no solo (CAD mais elevado), enquanto o PC2 está associado principalmente à combinação entre porte e forma das bacias.

Nos diagramas PC1 × PC2 para K=4, K=5 e K=6 são mostrados na figura 7, a separação entre grupos é organizada, em todos os casos, predominantemente ao longo de PC1. Em um extremo concentram-se bacias mais cristalinas, dissecadas e com CN mais alto, e no

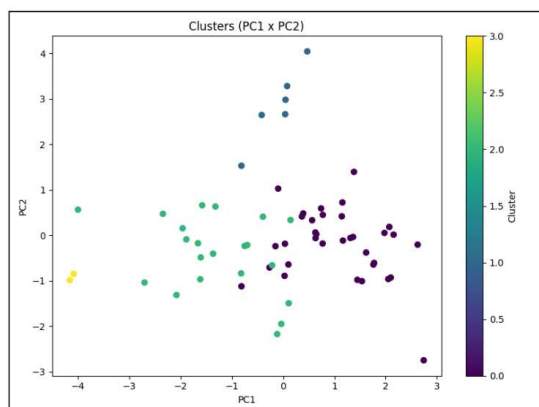
outro, bacias com maior CAD e valores mais baixos de CN, compatíveis com condições mais próximas de domínios transicionais ou sedimentares. O PC2, por sua vez, destaca um conjunto recorrente de macro-bacias alongadas, localizado nas porções extremas do eixo e caracterizado principalmente por áreas muito superiores às demais e índices de circularidade menores, configurando um tipo fortemente condicionado por escala e forma.

Também é recorrente, nos três cenários, a presença de um pequeno grupo de bacias situadas em posições extremas de PC1, associado a combinações singulares de declividade, CAD e CN. Essas bacias formam clusters de baixa cardinalidade nas soluções particionais e devem ser interpretadas como tipos particulares, com interesse descritivo e cartográfico, mas sem representar um padrão regional dominante.

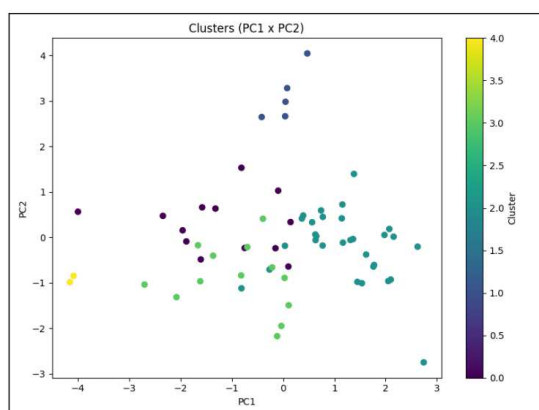
Em síntese, os resultados indicam que as soluções com $K=4$, $K=5$ e $K=6$ partilham a mesma estrutura básica no espaço PC1–PC2 – dominada pelo gradiente de PC1 e pela individualização de macro-bacias em PC2 – diferindo principalmente no grau de detalhamento com que subdividem os domínios cristalino e transicional. Nas seções seguintes, essa diferenciação é discutida de forma específica para cada valor de K .

Figura 7 - Agrupamentos (K-means) no plano PC1×PC2: K=4, K=5 e K=6.

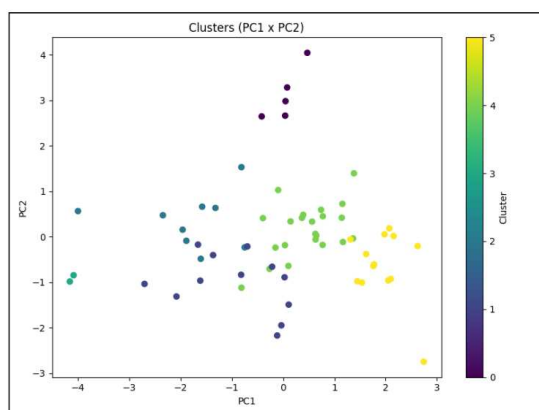
(a) K=4



(b) K=5



(c) K=6



Fonte: Autor (2025)

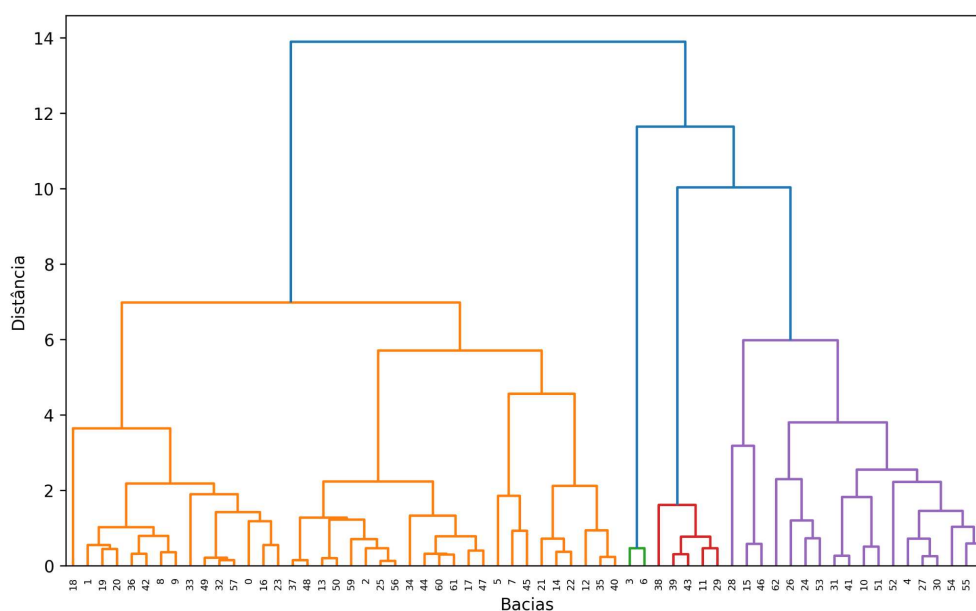
5.6 Agrupamento para K=4

A solução com K=4 organiza as bacias em quatro domínios fisiográficos principais, distinguindo conjuntos cristalinos e transicionais/sedimentares e isolando, adicionalmente, macro-bacias regionais e um grupo restrito de bacias com comportamento

extremo. A separação reflete sobretudo o contraste entre maior potencial relativo de escoamento superficial (CN e Dd mais altos, Crist elevado) e maior armazenamento no solo (CAD mais alto e CN mais baixo), com efeito secundário associado ao porte e à forma das bacias.

A Figura 8 apresenta o dendrograma obtido pelo método de Ward para o cenário $K=4$, que ilustra a estrutura de similaridade entre as bacias analisadas. O eixo vertical representa a distância, de modo que as fusões que ocorrem em níveis mais baixos indicam maior semelhança entre as bacias ou grupos de bacias. As cores distintas no dendrograma correspondem aos quatro grupos definidos, onde cada cor agrupa as bacias com perfis fisiográficos mais parecidos entre si, ele foi utilizado como apoio visual à leitura da partição.

Figura 8 - Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de Ward) para $K = 4$.



Fonte: Autor (2025)

5.6.1 Caracterização fisiográfica dos grupos para $K=4$

A tabela 5 descreve as características dos grupos para $K = 4$ de acordo com as variáveis fisiográficas.

Tabela 5 - Intervalos das variáveis fisiográficas por grupo de cluster para K=4.

GRUPO	Área (km ²)	Crist	Ic	Dd (km/km ²)	CAD (mm)	Decliv (%)	CN (mm)
0	46–17.241	0,83–1,00	0,12–0,36	0,68–1,41	56–90	3–19	68–85
1	20.682–68.992	0,73–0,81	0,10–0,13	0,70–0,89	74–80	9–9	73–77
2	560–12.357	0,00–0,93	0,11–0,33	0,29–1,03	57–101	2–13	63–76
3	225–471	0,99–0,99	0,21–0,21	0,64–0,64	108–113	25–29	63–63

Fonte: Autor (2025)

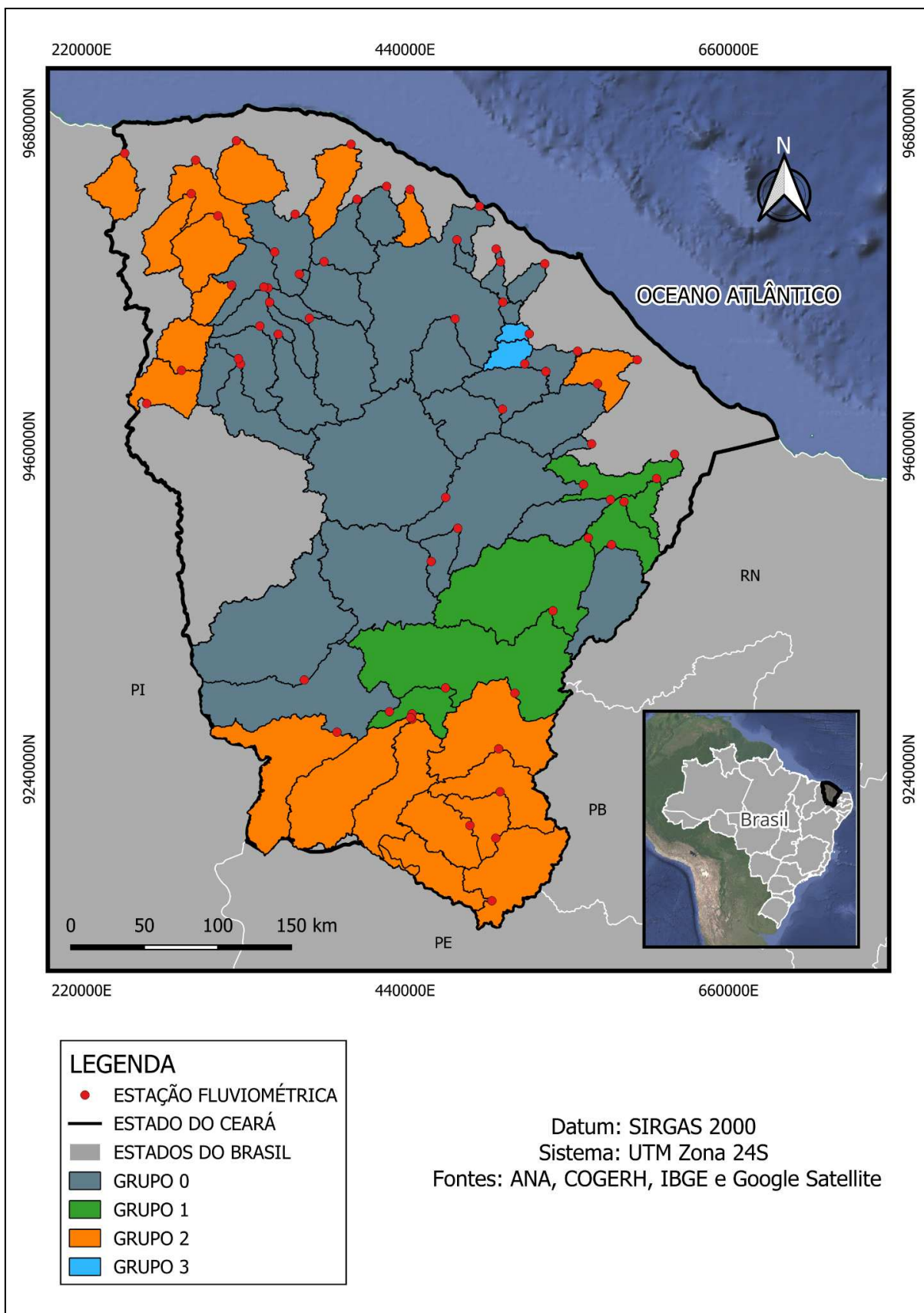
- **Grupo 0 (bacias cristalinas dissecadas):** Predominam bacias com Crist muito alto (0,83–1,00), Dd elevada (0,68–1,41 km/km²) e CN alto (68–85), enquanto o CAD tende a ser menor (56–90 mm). O conjunto expressa o domínio cristalino com maior dissecação da drenagem e maior potencial relativo de escoamento superficial.
- **Grupo 1 (macro-bacias cristalinas regionais):** Reúne as maiores bacias (20.682–68.992 km²), com Ic baixo (0,10–0,13), Crist alto (0,73–0,81), Dd elevada (0,70–0,89) e CN alto (73–77). Representa um tipo regional controlado pelo embasamento cristalino em grande escala.
- **Grupo 2 (bacias transicionais cristalino–sedimentares):** Apresenta ampla variação de Crist (0,00–0,93), Dd relativamente menor (0,29–1,03) e CAD podendo ser alto (57–101 mm), com CN mais baixo (63–76). Corresponde a bacias com maior heterogeneidade litológica e maior armazenamento potencial em parte do conjunto.
- **Grupo 3 (pequenas bacias íngremes de escarpas/planaltos):** Conjunto restrito de bacias pequenas (225–471 km²), com declividade muito elevada (25–29%), CAD alto (108–113 mm) e CN baixo (~63). É um tipo singular associado a relevo mais acidentado.

A relação das bacias por grupo encontra-se no Apêndice B.

5.6.2 Representação espacial dos grupos para K = 4

A figura 9 apresenta a distribuição espacial das bacias de contribuição classificadas nos quatro grupos para K=4.

Figura 9 - Distribuição espacial dos grupos para K=4.

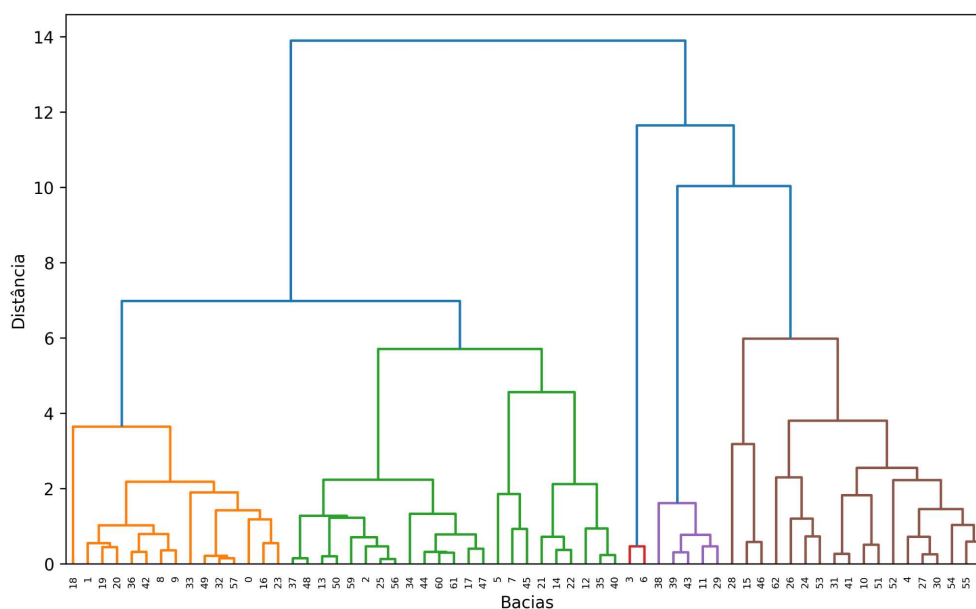


Observa-se um padrão espacial dominado por um grupo amplamente distribuído no interior do estado, formando um bloco contínuo que ocupa grande parte do Ceará. Em contraste, um segundo grupo apresenta concentração marcante no setor sul e em porções do noroeste, enquanto outro se organiza como uma faixa no leste/sudeste, indicando uma transição regional consistente com compartimentos fisiográficos distintos. O quarto grupo aparece de forma pontual e restrita, destacando bacias que se diferenciam fortemente do conjunto principal.

5.7 Agrupamento para K=5

O dendrograma da figura 10 indica um refinamento da estrutura observada em K=4, evidenciando subdivisões internas em níveis intermediários de distância que sustentam a separação em cinco grupos. Em particular, observa-se que parte do conjunto anteriormente agregado se desdobra em dois ramos mais coesos, compatíveis com a distinção entre subtipos transicionais, sem comprometer a individualização das macro-bacias e do grupo restrito de comportamento extremo.

Figura 10 - Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de Ward) para K = 5.



Fonte: Autor (2025)

5.7.1 Caracterização fisiográfica dos grupos para K=5

A Tabela 6 sintetiza os intervalos de variação das variáveis fisiográficas em cada grupo.

Tabela 6 - Intervalos das variáveis fisiográficas por grupo de cluster para K=5.

GRUPO	Área (km ²)	Crist	Ic	Dd (km/km ²)	CAD (mm)	Decliv (%)	CN (mm)
0	208–20.682	0,13–0,99	0,11–0,22	0,29–0,81	68–101	2–13	63–78
1	39.649–68.992	0,73–0,80	0,10–0,13	0,80–0,89	74–78	9–9	74–77
2	46–17.241	0,86–1,00	0,12–0,36	0,68–1,41	56–90	3–19	74–85
3	579–12.357	0,00–0,83	0,17–0,33	0,59–1,03	57–89	5–12	65–76
4	225–471	0,99–0,99	0,21–0,21	0,64–0,64	108–113	25–29	63–63

Fonte: Autor (2025)

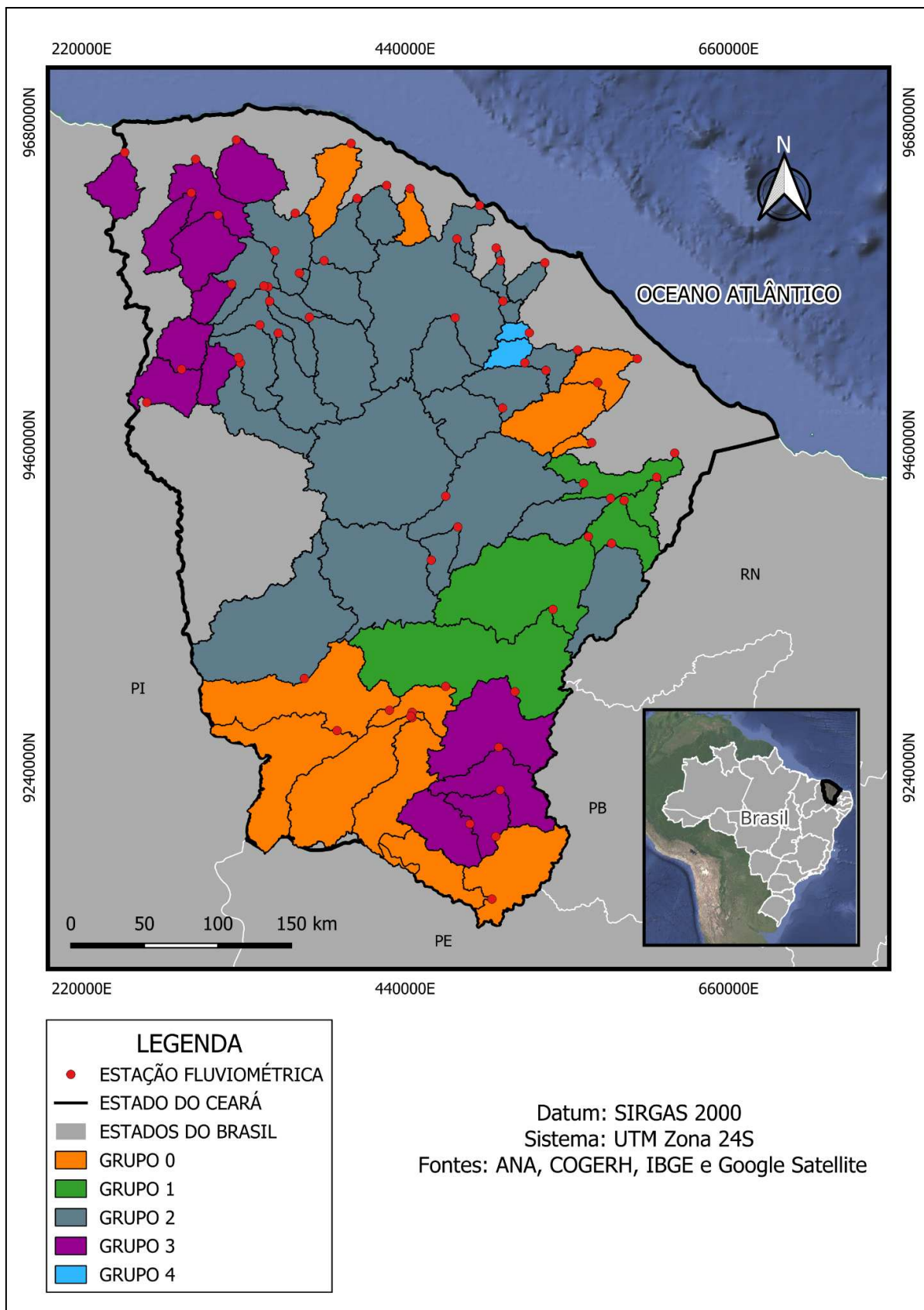
- **Grupo 0 (transicionais com maior CAD e Dd menor):** CN baixo a intermediário (63–78), CAD elevado (68–101 mm) e Dd menor (0,29–0,81), com Crist variando amplamente (0,13–0,99). Define bacias em domínio transicional nas quais o armazenamento potencial e a menor densidade de drenagem se destacam.
- **Grupo 1 (macro-bacias cristalinas regionais):** Concentra as maiores bacias (39.649–68.992 km²), com Ic baixo (0,10–0,13), Crist alto (0,73–0,80), Dd elevada (0,80–0,89) e CN alto (74–77). Representa o tipo regional de maior escala.
- **Grupo 2 (cristalinas dissecadas com CN mais alto):** Crist muito alto (0,86–1,00), Dd elevada (0,68–1,41) e CN alto (74–85), com CAD relativamente menor (56–90 mm). Expressa o domínio cristalino com maior potencial relativo de geração de escoamento superficial.
- **Grupo 3 (transicionais menos cristalinas e mais circulares):** Crist pode ser baixo (0,00–0,83) e Ic é mais alto (0,17–0,33), com Dd moderada (0,59–1,03), CAD moderado (57–89 mm) e CN em faixa intermediária (65–76). Diferencia um subtipo transicional em que forma e menor contribuição cristalina se tornam mais evidentes.
- **Grupo 4 (pequenas bacias íngremes):** Bacias pequenas (225–471 km²), Decliv muito elevada (25–29%), CAD alto (108–113 mm) e CN baixo (~63). Mantém assinatura própria e baixa sobreposição com os demais grupos.

A relação das bacias por grupo encontra-se no Apêndice B.

5.7.2 Representação espacial dos grupos para $K = 5$

A Figura 11 apresenta a distribuição espacial das bacias de contribuição classificadas nos cinco grupos para $K=5$.

Figura 11 - Distribuição espacial dos grupos para K=5.



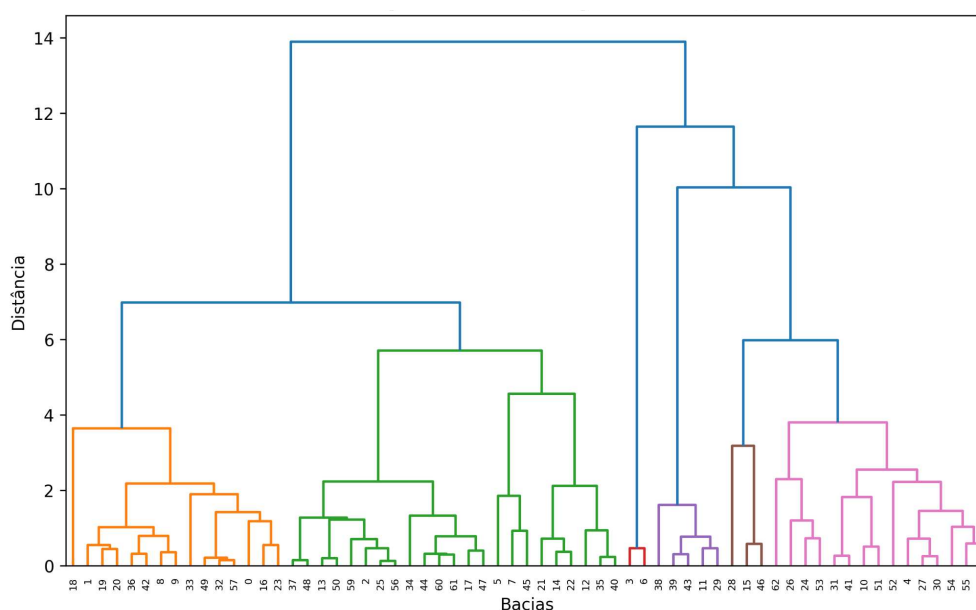
Fonte: Autor (2025)

Na solução $K = 5$, o mapa evidencia maior regionalização dos padrões: o grupo predominante (Grupo 0) estrutura-se como um domínio contínuo em grande parte do estado, enquanto os demais grupos passam a ocupar compartimentos mais definidos, com destaque para: (i) um conjunto concentrado no noroeste e também no sul, associado a bacias com comportamento fisiográfico diferenciado; (ii) um grupo com presença mais expressiva no leste/sudeste; e (iii) um grupo pontual, que permanece espacialmente bem delimitado. Essa configuração reduz a mistura espacial entre classes e explicita subdomínios que, em $K = 4$, ainda apareciam agregados.

5.8 Agrupamento para $K=6$

O dendrograma da figura 12 mostra que $K=6$ resulta do desdobramento de conjuntos já coesos, produzindo subgrupos mais próximos entre si. Assim, o ganho de detalhe vem acompanhado de menor contraste hierárquico entre alguns grupos.

Figura 12 - Dendrograma do agrupamento hierárquico (método de Ward) para $K = 6$.



Fonte: Autor (2025)

5.8.1 Caracterização fisiográfica dos grupos para $K=6$

Na configuração com $K=6$, os intervalos das sete variáveis fisiográficas por grupo são apresentados na Tabela 7, mostrando um detalhamento adicional sobretudo no domínio cristalino, agora subdividido em grupos com diferentes combinações de CN, CAD e Dd.

Tabela 7 - Intervalos das variáveis fisiográficas por grupo de cluster para K=6.

GRUPO	Área (km ²)	Crist	Ic	Dd (km/km ²)	CAD (mm)	Decliv (%)	CN (mm)
0	39.649–68.992	0,73–0,80	0,10–0,13	0,80–0,89	74–78	9–9	74–77
1	579–9.026	0,00–0,83	0,17–0,33	0,59–1,03	57–89	5–12	65–76
2	560–20.682	0,13–0,93	0,11–0,20	0,29–0,75	68–101	4–13	63–75
3	225–471	0,99–0,99	0,21–0,21	0,64–0,64	108–113	25–29	63–63
4	170–17.241	0,50–1,00	0,12–0,22	0,68–1,09	66–90	2–19	74–80
5	46–11.274	0,86–1,00	0,15–0,36	0,83–1,41	56–71	4–11	77–85

Fonte: Autor (2025)

- **Grupo 0 (macro-bacias cristalinas regionais):** Reúne as maiores bacias (39.649–68.992 km²), com Ic baixo (0,10–0,13), Crist alto (0,73–0,80), Dd elevada (0,80–0,89) e CN alto (74–77). Mantém o tipo regional de grande escala.
- **Grupo 1 (transicionais mais circulares, dissecação moderada):** Ic mais elevado (0,17–0,33) e Crist podendo ser baixo (até 0), com Dd em faixa intermediária (0,59–1,03), CAD moderado (57–89 mm) e CN moderado (65–76). Define um subtipo transicional em que forma e organização da drenagem ganham relevância.
- **Grupo 2 (transicionais com maior CAD e Dd menor):** Dd mais baixa (0,29–0,75), CAD alto (68–101 mm) e CN mais baixo (63–75), com Crist variando amplamente (0,13–0,93). Reforça o domínio transicional associado a maior armazenamento potencial e rede menos densa.
- **Grupo 3 (pequenas bacias íngremes):** Bacias pequenas (225–471 km²), Decliv muito elevada (25–29%), CAD alto (108–113 mm) e CN baixo (~63). Permanece como tipo singular ligado a compartimentos de escarpa/planalto.
- **Grupo 4 (cristalinas típicas/intermediárias):** Crist alto (0,50–1,00), Dd moderada a alta (0,68–1,09) e CN alto, porém menos extremo (74–80), com CAD variando entre 66 e 90 mm. Representa o domínio cristalino “típico”, intermediário em relação ao grupo mais extremo.
- **Grupo 5 (cristalinas dissecadas, CN muito alto e CAD baixo):** Crist muito alto (0,86–1,00), Dd elevada (0,83–1,41), CAD mais baixo (56–71 mm) e CN

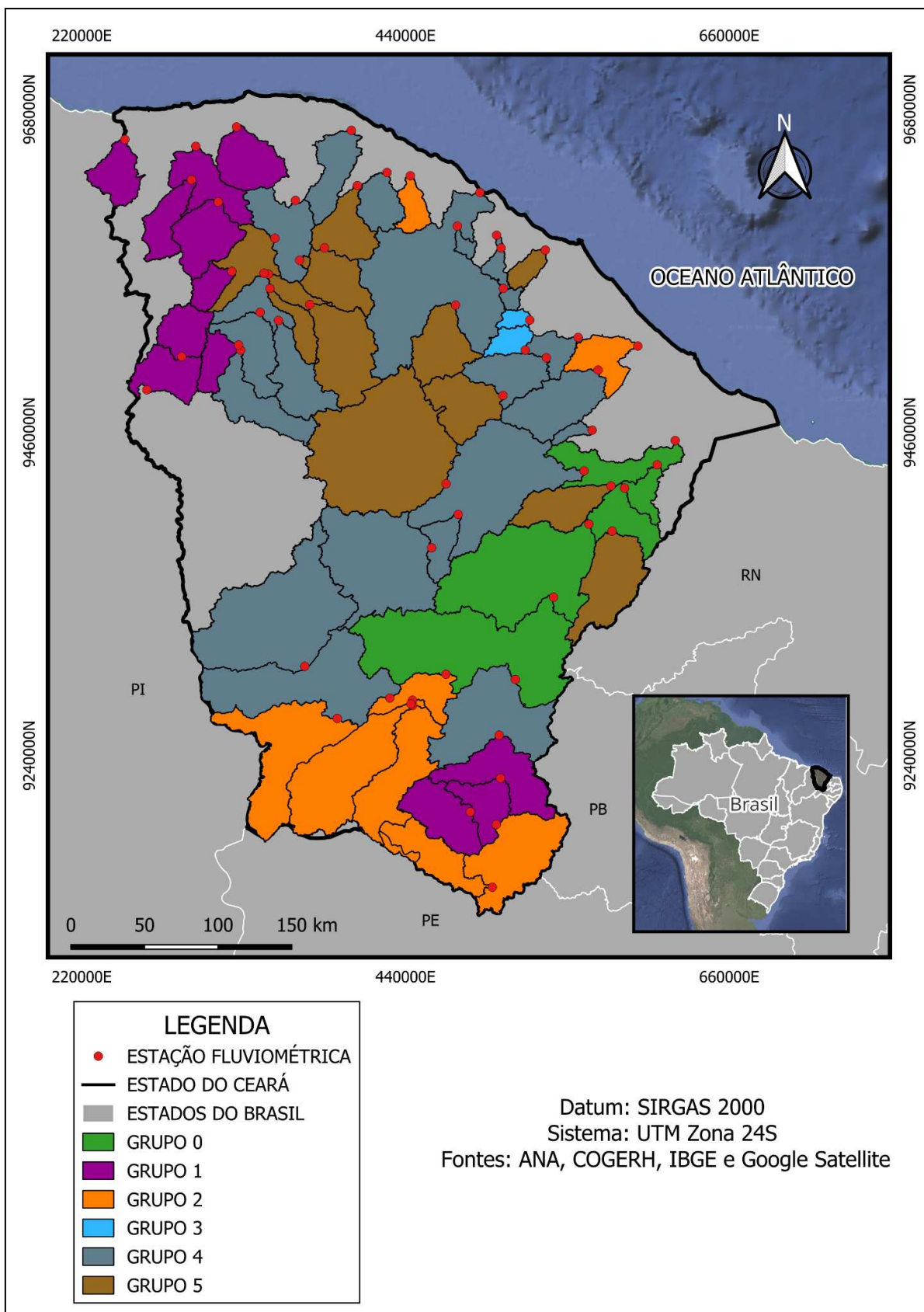
mais alto (77–85). Expressa o extremo cristalino com maior potencial relativo de escoamento superficial.

A relação das bacias por grupo encontra-se no Apêndice B.

5.8.2 Representação espacial dos grupos para $K = 6$

A Figura 13 apresenta a distribuição espacial das bacias de contribuição classificadas para $K=6$.

Figura 13 - Distribuição espacial dos grupos para K=6.



Fonte: Autor (2025)

O domínio cristalino, que em $K=5$ era representado por um único grupo, passa a ser dividido em cristalinas intermediárias e cristalinas extremas, distribuídas em mosaico sobre o interior do estado. As macro-bacias alongadas permanecem como grandes polígonos no setor centro-sul, e o grupo de bacias íngremes continua restrito a poucas bacias de pequena área no centro-norte.

Os dois grupos transicionais – armazenamento alto e drenagem muito baixa e transicionais pouco cristalinas e mais circulares – mantêm localização semelhante à observada em $K=5$, com conjuntos definidos no sul/sudoeste e no noroeste/sudeste do Ceará, respectivamente. Em comparação com o cenário adotado de $K=5$, o mapa de $K=6$ acrescenta detalhamento sobretudo dentro do domínio cristalino, mas com maior fragmentação espacial, o que dificulta a definição de compartimentos regionais bem delimitados.

5.9 Síntese comparativa e tipologia adotada

5.9.1 Critérios de escolha e justificativa da adoção de $K = 5$

As três configurações de agrupamento apresentam a mesma espinha dorsal: em todos os casos aparecem macro-bacias cristalinas, um pequeno grupo de bacias muito íngremes e um conjunto que representa o domínio cristalino típico. O que muda entre $K=4$, $K=5$ e $K=6$ é o grau de detalhamento imposto aos domínios transicionais e ao próprio domínio cristalino.

O índice silhouette médio é maior em $K=4$, indicando melhor separação geométrica global do que em $K=5$ e $K=6$. Em compensação, em $K=4$ todo o conjunto de bacias transicionais é reunido em um único grupo, que mistura sistemas com combinações distintas de Crist, CAD, Dd e CN, reduzindo a capacidade de distinguir subtipos com significado fisiográfico claro.

Em $K=5$, o antigo grupo transicional é dividido em dois tipos: um com CAD mais elevado e drenagem mais rarefeita (Grupo 0) e outro com menor participação cristalina e formas mais circulares, com CN mais baixo (Grupo 3). Essa diferença aparece tanto nas estatísticas quanto na organização espacial dos grupos. Já em $K=6$ o refinamento recai principalmente sobre o domínio cristalino, que passa a ser subdividido em um grupo intermediário e um grupo mais extremo em termos de CN e CAD, gerando um padrão mais fragmentado e de interpretação regional menos direta.

De forma sintética, $K=4$ agrega demais os domínios transicionais e $K=6$ fragmenta excessivamente o domínio cristalino. A solução $K=5$ mantém a estrutura principal

(domínio cristalino típico, macro-bacias e bacias íngremes) e, ao mesmo tempo, explicita dois subtipos transicionais bem diferenciados, oferecendo o melhor equilíbrio entre separação geométrica, interpretação fisiográfica e coerência espacial.

5.9.2 Tipologia fisiográfica adotada

A partir da solução com $K=5$, foram definidos cinco tipos fisiográficos de bacias contribuintes, que passam a ser a referência deste trabalho. O quadro 4 apresenta a nomenclatura adotada para cada tipo e a quantidade de bacias enquadradas em cada classe. Na sequência, descrevem-se as principais características fisiográficas que fundamentam a interpretação de cada tipo.

Quadro 4 - Distribuição das bacias por tipo fisiográfico ($K=5$).

COR / TIPO / NOMENCLATURA			Nº DE BACIAS
	1	Bacias cristalinas dissecadas com CN elevado	30
	2	Macro-bacias cristalinas alongadas	5
	3	Bacias com armazenamento alto e drenagem rarefeita	13
	4	Bacias transicionais pouco cristalinas e mais circulares	13
	5	Pequenas bacias íngremes de escarpas/planaltos	2

Fonte: Autor (2025)

- Tipo 1 – Bacias cristalinas dissecadas com CN elevado (Grupo 2):

Domínio cristalino típico, que ocupa a maior parte do interior do estado e concentra a maioria das bacias, com combinação de alta dissecação e maior potencial fisiográfico de geração de escoamento superficial.

- Tipo 2 – Macro-bacias cristalinas alongadas (Grupo 1):

Conjunto de poucas bacias de grande porte, inseridas no mesmo domínio cristalino, mas individualizadas pelo forte controle de escala e forma, com papel estruturante na rede de drenagem.

- Tipo 3 – Bacias com armazenamento alto e drenagem rarefeita (Grupo 0):

Bacias localizadas sobretudo no sul e sudoeste, em zonas de transição, marcadas por maior capacidade de armazenamento e densidade de drenagem menor, configurando um subtipo em que o escoamento superficial tende a ser menos dominante.

- Tipo 4 – Bacias transicionais pouco cristalinas e mais circulares (Grupo 3):

Outro subtipo transicional, com menor participação do embasamento cristalino e formas mais circulares, distribuído principalmente em setores noroeste e sudeste, reforçando a existência de mais de um padrão de transição entre cristalino e sedimentar.

- Tipo 5 – Pequenas bacias íngremes de escarpas/planaltos (Grupo 4):

Tipo particular, formado por poucas bacias de pequena área e relevo acentuado no centro-norte, que representa compartimentos extremos associados a escarpas e planaltos.

Essa tipologia resume, de forma operacional, os principais contrastes fisiográficos identificados nas análises anteriores, articulando domínios cristalinos, transicionais e de relevo extremo em um conjunto de cinco classes aplicável à regionalização e à interpretação comparativa das bacias estudadas.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho caracterizou fisiograficamente as bacias de contribuição das estações fluviométricas do estado do Ceará e propôs uma tipologia baseada em dados geoespaciais e análise estatística multivariada. Delimitaram-se 63 bacias em ambiente SIG e, a partir de um conjunto de variáveis fisiográficas selecionadas com apoio da matriz de correlação, aplicou-se a PCA seguida de análise de agrupamento. Esse encadeamento — redução de dimensionalidade seguida de classificação por similaridade — é consistente com abordagens de regionalização hidrológica que buscam identificar unidades homogêneas a partir de descritores físicos e, a partir disso, oferecer suporte a análises comparativas e transferência de informação em contextos de monitoramento limitado (Rami et al., 2022; Mihret et al., 2024).

Os três primeiros componentes principais sintetizaram a maior parte da variabilidade dos dados, expressando gradientes de porte e forma das bacias, controle geológico-geomorfológico e condições de armazenamento no solo e de uso e cobertura da terra. A retenção de poucos componentes com interpretação física clara também é reportada em estudos que utilizam PCA como etapa preparatória ao agrupamento, justamente para concentrar a variabilidade relevante em poucos eixos antes da classificação por similaridade (Mihret et al., 2024). A comparação das soluções com $K=4$, $K=5$ e $K=6$ indicou $K=5$ como melhor compromisso entre separação geométrica e coerência fisiográfica e espacial dos grupos, em linha com a prática de confrontar diferentes particionamentos e priorizar soluções com consistência física e verificações de desempenho na atribuição de bacias a grupos (Rami et al., 2022). A tipologia resultante distingue cinco tipos de bacias: cristalinas dissecadas de porte intermediário; grandes bacias cristalinas regionais; bacias com maior capacidade de armazenamento e drenagem mais rarefeita; bacias transicionais pouco cristalinas e mais circulares; e pequenas bacias íngremes associadas a escarpas e planaltos.

A organização espacial desses grupos é compatível com os principais domínios cristalinos e sedimentares e com as unidades de relevo do estado, o que confere plausibilidade física à tipologia proposta. Essa aderência entre clusters e padrões fisiográficos de escala regional é um atributo desejável em tipologias voltadas à regionalização, e resultados análogos têm sido apontados quando a classificação reproduz gradientes fisiográficos e meteorológicos reconhecidos no território analisado (Mihret et al., 2024). Esse quadro de referência pode apoiar comparações entre bacias, seleção de unidades representativas e exercícios de regionalização hidrológica em áreas com séries de vazão limitadas.

Como continuidade, destaca-se a possibilidade de relacionar os grupos fisiográficos com indicadores hidrológicos observados (vazões médias, vazões de referência, coeficientes de escoamento, parâmetros de modelos chuva–vazão), avaliando em que medida a tipologia física se reflete na resposta hidrológica. Outras extensões incluem a incorporação de variáveis climáticas e a aplicação da abordagem a bacias não monitoradas, ampliando seu uso no planejamento de recursos hídricos em escala regional; nessa direção, estudos recentes têm mostrado que a inclusão de informações hidrometeorológicas e variáveis derivadas de sensoriamento remoto pode refinar a identificação de regiões homogêneas e fortalecer a ponte entre tipologias físicas e aplicações voltadas à previsão/gestão em bacias com escassez de dados (Rami et al., 2022; Mihret et al., 2024).

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Elementos de hidrologia aplicada**. São Paulo: Blucher, 2022.
- BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 269–300.
- BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997.
- BRAZ, Adalto Moreira et al. Análise de agrupamento (cluster) para tipologia de paisagens. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, e19011, 2020. DOI: 10.4215/rm2020.e19011.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (orgs.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1-1–1-5.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.
- CUNHA, S. F. et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 837-848, 2015.
- DORMANN, Carsten F. *et al.* **Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance**. *Ecography*, v. 36, n. 1, p. 27-46, 2013. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x.
- EVERITT, B. S. et al. **Cluster analysis**. 5. ed. Chichester: Wiley, 2011.
- HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HAMADA, Emília; GONÇALVES, Renata Ribeiro do Valle. **Introdução ao geoprocessamento: princípios básicos e aplicação**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2007. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 67).
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007.
- JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis**. 2. ed. New York: Springer, 2002.
- KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. J. **Finding groups in data: an introduction to cluster analysis**. Hoboken: Wiley, 1990.
- MARCELLINI, S. S. **Diretrizes para utilização de tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na exploração de informações hidrológicas – exemplos de aplicação**. 2002. 228 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MIHRET, Temesgen Tsehayeneh; ZEMALE, Fasikaw A.; WORQLUL, Abeyou W.; AYALEW, Ayenew D.; FOHRER, Nicola. **Identification of hydrologically homogenous watersheds and climate-vegetation dynamics in the Blue Nile Basin of Ethiopia.** *Hydrology Research*, v. 55, n. 3, p. 280–300, 2024. DOI: 10.2166/nh.2024.098. Disponível em: <https://repo.mel.cgiar.org/items/671cf45a-7ec7-471f-8c72-e5355b712e18>. Acesso em: 23 dez. 2025.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007.

ODRESKI, L. F. **Classificação da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição em microbacias e determinação do Curve Number (CN) utilizando técnicas de geoprocessamento e dados de sensoriamento remoto - Florianópolis - SC.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

OLIVEIRA, U.; OLIVEIRA, P. Mapas de Kernel como Subsídio à Gestão Ambiental: Análise dos Focos de Calor na Bacia Hidrográfica do Rio Acaraú, Ceará, nos anos 2010 a 2015. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 87-99, 2017.

PINTO, N. L.; HOLTZ, A. C.; MARTINS, J. A. **Hidrologia Básica.** São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

RAMI, Oumaima; HASNAOUI, Moulay Driss; OUAZAR, Driss; BOUZIANE, Ahmed. **A mixed clustering-based approach for a territorial hydrological regionalization.** *Arabian Journal of Geosciences*, v. 15, art. 75, 2022. DOI: 10.1007/s12517-021-09286-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-021-09286-3>. Acesso em: 23 dez. 2025.

SANTANA, R. M. **Uso de geotecnologias na caracterização da fragilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ariranha – Jataí (GO).** 2017. 58 p. Monografia (Especialização/Graduação) – Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2017.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações.** Ilhéus: Editus, 2002. Disponível em: https://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf. Acesso em: 15 nov. 2025.

SILVA, Quésia Duarte da. **Mapeamento geomorfológico da Ilha do Maranhão.** 2012. 249 f. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/1a95263c-4584-4b35-9b0f-1e72965be57b/content>. Acesso em: 10 out. 2025.

SILVA, M. J. A. A evolução legal e institucional na gestão dos recursos hídricos no Brasil. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA**, 17., 2017, Campinas. Anais. Campinas: UNICAMP, 2017. p. 146-157. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/1786>. Acesso em: 15 nov. 2025.

SILVEIRA, A. L. **Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 1997.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, 2000. p. 35-51.

SILVEIRA, G. L.; ROBAINA, A. D.; GIOTTO, E. Outorga para uso de recursos hídricos: aspectos práticos e conceituais para o estabelecimento de um sistema informatizado. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 5-16, 1998.

SPRING. SPRING: **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. Versão 4.3. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/>. Acesso em: 12 dez. 2025.

TEIXEIRA, R. F. B. **Inferência do estado geral da umidade superficial do solo pelo índice de seca temperatura-vegetação e por imagens do satélite NOAA-17: aplicações no semiárido do Ceará**. 2010. 120 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2007.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **What is Hydrology? Water Science School**. 2019. Disponível em: <https://www.usgs.gov/water-science-school/science/what-hydrology>. Acesso em: 15 nov. 2025.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Water Science School. O Ciclo d'água, The water cycle, Portuguese**. 21 fev. 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-dagua-water-cycle-portuguese>. Acesso em: 15 nov. 2025.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WARD, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963.

ZAIDAN, Ricardo Tavares. **Geoprocessamento: conceitos e definições**. Revista de Geografia - PPGeo - UFJF, Juiz de Fora, v. 7, n. 2, p. 195-201, jul./dez. 2017.

DOI: 10.34019/2236-837X.2017.v7.18073. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/geografia/article/view/18073>. Acesso em: 14 dez. 2025.

APÊNDICES

APÊNDICE A - PARÂMETROS FISIOMÉTRICOS DAS BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		ÁREA (km ²)	PERÍ- METRO (km)	LT (km)	Crist.	Kc	Ic	Dd (km/km ²)	CAD (mm)	Decliv (%)	CN (mm)
ID	NOME										
36386000	ALTO SANTO	2144	395	3016	0,89	2,39	0,17	1,41	71	10	77
35370000	AMONTADA	2674	402	2223	0,99	2,18	0,21	0,83	64	8	84
36020000	ARNEIROZ	5869	644	4637	0,98	2,35	0,18	0,79	74	7	78
35871000	ARRAIAL	471	168	300	0,99	2,17	0,21	0,64	113	25	63
35263000	ARARIUS	579	184	552	0,43	2,14	0,21	0,95	70	9	66
35390000	BARRENTO	560	201	418	0,93	2,37	0,17	0,75	101	13	70
35740000	BARRA NOVA	225	117	145	0,99	2,18	0,21	0,64	108	29	63
35370600	BETÂNIA	910	228	832	0,94	2,11	0,22	0,91	90	10	74
35830000	CAIO PRADO	1614	295	1412	0,99	2,05	0,23	0,88	66	11	82
35669100	CAMPO GRANDE	417	151	390	0,98	2,06	0,23	0,94	64	9	79
36130000	CARIÚS	5950	683	3801	0,67	2,48	0,16	0,64	84	11	68
36370000	CASTANHÃO	44995	2095	38999	0,76	2,77	0,13	0,87	76	9	75
35050000	CHAVAL RETIRO	1000	225	735	0,55	2,00	0,25	0,74	57	11	75
35880000	CHOROZINHO	4045	539	3021	0,90	2,37	0,18	0,75	74	11	77
35950000	CRISTAIS	2036	337	1479	0,85	2,09	0,22	0,73	83	5	78
34730000	CROATÁ	1023	237	602	0,00	2,07	0,23	0,59	60	8	65
35251000	CURRAL VELHO	627	230	544	1,00	2,57	0,15	0,87	65	5	85
35210000	FAZ. CAJAZEIRAS	1553	386	1526	1,00	2,74	0,13	0,98	66	9	76
35279000	FAZ. BELA VISTA	46	40	39	1,00	1,66	0,36	0,86	56	5	85
35258000	FAZ. PARANÁ	2370	361	2300	0,99	2,08	0,23	0,97	61	10	83
35350000	FAZ. POÇO VERDE	1386	274	1159	0,99	2,06	0,23	0,84	61	8	85
35223000	FLORES	693	201	687	0,83	2,14	0,22	0,99	70	10	68
35170000	GRANJA	3960	487	3500	0,63	2,17	0,21	0,88	68	10	71
35260000	GROAÍRAS	2801	474	2625	0,99	2,51	0,16	0,94	61	9	83
36290000	ICÓ	12357	957	10835	0,56	2,41	0,17	0,88	78	9	74
35875500	IDEAL	2944	473	2318	0,96	2,44	0,17	0,79	73	10	80
36160000	IGUATU	20682	1458	14507	0,81	2,84	0,12	0,70	80	9	73
35900000	ITAPEIM	3101	453	1965	0,65	2,28	0,19	0,63	83	4	75
36220000	JATI	1488	408	436	0,13	2,96	0,11	0,29	87	4	63
36320000	JAGUARIBE	39649	2109	31532	0,73	2,97	0,11	0,80	78	9	74
36270000	LAV. DA MANGABEIRA	9026	751	7679	0,42	2,21	0,20	0,85	77	9	73
36045000	MALHADA	3456	623	1830	0,73	2,97	0,11	0,53	68	8	69
35571000	MELANCIA	170	110	185	1,00	2,36	0,18	1,09	83	3	77
36586000	MELÕES	1368	309	1396	0,86	2,34	0,18	1,02	58	4	84
36580000	MORADA NOVA II	17241	1359	16732	0,98	2,90	0,12	0,97	69	9	80

35125000	MORAÚJO	1583	256	1626	0,49	1,80	0,30	1,03	73	10	71
35551000	PARAMOTI	1554	306	1465	1,00	2,17	0,21	0,94	69	10	84
36515000	PASSAGEM POÇO DA PEDRA	5248	689	4553	1,00	2,66	0,14	0,87	76	11	77
36628000	PASSAGEM RUSSAS	68992	2668	61437	0,80	2,84	0,12	0,89	74	9	77
36390000	PEIXE GORDO	48307	2256	43050	0,75	2,87	0,12	0,89	77	9	75
35205000	PESQUEIRO	1456	236	1036	0,79	1,73	0,33	0,71	84	5	76
36250000	PODIMIRIM	4332	688	2819	0,54	2,93	0,12	0,65	81	7	70
36520000	QUIXERAMOBIM	7045	650	6430	1,00	2,17	0,21	0,91	68	10	83
36615000	QUIXERÉ	48921	2536	43276	0,75	3,21	0,10	0,88	77	9	76
35570000	SÃO LUÍS DO CURU	8490	868	7483	0,95	2,64	0,14	0,88	69	11	78
35640000	SÃO VICENTE	180	102	123	0,98	2,13	0,22	0,68	73	19	74
34740000	SAUDOSO	2231	364	1434	0,00	2,15	0,21	0,64	59	8	68
35283000	SANTANA DO ACARAÚ	13036	1063	12218	0,91	2,61	0,15	0,94	66	9	78
36470000	SENADOR POMPEU	4524	631	3916	1,00	2,63	0,14	0,87	75	12	77
35255000	SIARÃO	6655	663	6197	0,96	2,28	0,19	0,93	67	8	77
36630000	SÍTIO AGUA FRIA	208	121	141	0,99	2,36	0,18	0,68	84	8	78
36110000	SÍTIO CONCEIÇÃO	2423	498	1450	0,65	2,83	0,12	0,60	84	12	67
36210000	SÍTIO LAPINHA	1663	299	1166	0,19	2,05	0,23	0,70	89	10	66
36070000	SÍTIO PATOS	13664	1140	9776	0,88	2,73	0,13	0,72	73	8	75
36125000	SÍTIO POÇO DANTAS	3536	473	2356	0,67	2,23	0,20	0,67	83	10	69
36260000	SÍTIO SANTA CRUZ	6936	673	5162	0,28	2,26	0,19	0,74	84	8	71
35650000	SÍTIOS NOVOS	469	196	379	0,99	2,54	0,15	0,81	70	10	78
35275000	SOBRAL	11275	845	10618	0,91	2,23	0,20	0,94	64	9	78
35156000	TAPERA	1010	275	773	0,49	2,42	0,17	0,77	66	12	66
35240000	TRAPIÁ	1534	338	1398	1,00	2,42	0,17	0,91	69	12	77
35668000	UMARITUBA NOVA	503	224	403	0,99	2,80	0,13	0,80	70	10	78
35235000	VÁRZEA DO GROSSO	3619	563	3592	0,93	2,62	0,14	0,99	73	8	75
35301000	VILA NOVA	1289	337	1047	0,50	2,63	0,14	0,81	73	2	76

APÊNDICE B - ESTAÇÕES POR GRUPO DE CLUSTER

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		CLUSTER			ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA		CLUSTER		
ID	NOME	K4	K5	K6	ID	NOME	K4	K5	K6
36386000	ALTO SANTO	0	2	5	35571000	MELANCIA	0	2	4
35370000	AMONTADA	0	2	5	36586000	MELÕES	0	2	5
36020000	ARNEIROZ	0	2	4	36580000	MORADA NOVA II	0	2	4
35871000	ARRAIAL	3	4	3	35125000	MORAÚJO	2	3	1
35263000	ARARIUS	2	3	1	35551000	PARAMOTI	0	2	5
35390000	BARRENTO	2	0	2	36515000	PASSAGEM POÇO DA PEDRA	0	2	4
35740000	BARRA NOVA	3	4	3	36628000	PASSAGEM RUSSAS	1	1	0
35370600	BETÂNIA	0	2	4	36390000	PEIXE GORDO	1	1	0
35830000	CAIO PRADO	0	2	5	35205000	PESQUEIRO	2	3	1
35669100	CAMPO GRANDE	0	2	5	36250000	PODIMIRIM	2	0	2
36130000	CARIÚS	2	0	2	36520000	QUIXERAMOBIM	0	2	5
36370000	CASTANHÃO	1	1	0	36615000	QUIXERÉ	1	1	0
35050000	CHAVAL RETIRO	2	3	1	35570000	SÃO LUÍS DO CURU	0	2	4
35880000	CHOROZINHO	0	2	4	35640000	SÃO VICENTE	0	2	4
35950000	CRISTAIS	0	0	4	34740000	SAUDOSO	2	3	1
34730000	CROATÁ	2	3	1	35283000	SANTANA DO ACARAÚ	0	2	4
35251000	CURRAL VELHO	0	2	5	36470000	SENADOR POMPEU	0	2	4
35210000	FAZ. CAJAZEIRAS	0	2	4	35255000	SIARÃO	0	2	4
35279000	FAZ. BELA VISTA	0	2	5	36630000	SÍTIO AGUA FRIA	0	0	4
35258000	FAZ. PARANÁ	0	2	5	36110000	SÍTIO CONCEIÇÃO	2	0	2
35350000	FAZ. POÇO VERDE	0	2	5	36210000	SÍTIO LAPINHA	2	3	1
35223000	FLORES	0	3	1	36070000	SÍTIO PATOS	0	0	4
35170000	GRANJA	2	3	1	36125000	SÍTIO POÇO DANTAS	2	0	2
35260000	GROAÍRAS	0	2	5	36260000	SÍTIO SANTA CRUZ	2	3	1
36290000	ICÓ	2	3	4	35650000	SÍTIOS NOVOS	0	2	4
35875500	IDEAL	0	2	4	35275000	SOBRAL	0	2	5
36160000	IGUATU	1	0	2	35156000	TAPERA	2	3	1
35900000	ITAPEIM	2	0	2	35240000	TRAPIÁ	0	2	4

36220000	JATI	2	0	2	35668000	UMARITUBA NOVA	0	2	4
36320000	JAGUARIBE	1	1	0	35235000	VÁRZEA DO GROSSO	0	2	4
36270000	LAV. DA MANGABEIRA	2	3	1	35301000	VILA NOVA	2	0	4
36045000	MALHADA	2	0	2					

APÊNDICE C – DADOS DE ENTRADA E BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO DAS
ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

TIPOLOGIA FISIAGRÁFICA