

Vanessa Martins Lopes

Doutorado em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), professora da rede estadual de educação da Paraíba
wan.martins19@gmail.com

Oswaldo Girão

Docente no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
osgirao@@gmail.com

Morfometria e controles litoestruturais da Bacia Hidrográfica do Rio Bastiões, Ceará¹

Resumo

A bacia hidrográfica constitui-se em uma unidade de planejamento e gestão eficaz para a compreensão de formas e processos de ordem físico-natural, socioeconômica e cultural. Para que sua gestão seja eficiente, torna-se essencial uma análise do ponto de vista quantitativo, dentre as quais se destaca a análise morfométrica. Essa abordagem permite avaliar as interações entre formas e processos, possibilitando uma caracterização mais precisa das formas e dinâmicas ambientais desse sistema. Este trabalho tem por objetivo a análise morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Bastiões (BHRB), localizada no sul do estado do Ceará e inserida nos domínios da Depressão Sertaneja e da Chapada do Araripe, semiárido brasileiro. A pesquisa foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento e análise de dados matriciais e vetoriais com o uso do software ArcGIS 10.1. A partir de alguns parâmetros morfométricos, como índice de circularidade, coeficiente de manutenção e densidade de drenagem, foi possível compreender a configuração físico-natural da bacia e o papel de controles litoestruturais sobre a diversidade fluvial da região. Além disso, o formato alongado da BHRB aponta um padrão de resposta hidrológica mais lenta frente a *inputs* e à disseminação de mudanças na paisagem.

Palavras-chave: Análise Morfométrica, Hidrografia, Geologia, Semiárido.

Abstract

MORPHOMETRY AND LITHOSTRUCTURAL CONTROLS OF THE BASTIÕES RIVER BASIN, CEARÁ

The river basin is an effective planning and management unit for understanding physical-natural, socioeconomic and cultural forms and processes. For its management to be efficient, an analysis from a quantitative point of view is essential, among which morphometric analysis stands out. This approach allows the evaluation of the interactions between forms and processes, enabling a more precise characterization of the environmental forms and dynamics of this system. This study aims to perform a morphometric analysis of the Bastiões River Basin (BHRB), located in the south of the state of Ceará and inserted in the domains of the Depressão Sertaneja and Chapada do Araripe, in the Brazilian semi-arid region. The research was carried out using geoprocessing techniques and analysis of matrix and vector data using ArcGIS 10.1 software. Based on some morphometric parameters such as circularity index, maintenance coefficient and drainage density, it was possible to understand the physical-natural configuration of the basin and the role of lithostructural controls on the river diversity of the region. Furthermore, the elongated shape of the BHRB indicates a slower hydrological response pattern to inputs and the dissemination of changes in the landscape.

Key-words: Morphometric Analysis, Hydrography, Geology, Semi-arid.

1. Introdução

A bacia hidrográfica pode ser compreendida como uma porção de terras drenadas por um canal principal e seus afluentes, formada nas porções mais altas do relevo por divisores de água. Essas águas pluviais escoam superficialmente formando riachos e rios, ou, através do processo de infiltração no solo, dão origem às nascentes e alimentam os lençóis freáticos (BARRELLA, 2000)

Sendo um sistema geomorfológico aberto, que recebe energia através de agentes climáticos e perde através do deflúvio (LIMA, 1994, apud LIMA; ZAKIA, 2000, p. 1), sua configuração e dinâmica é determinada pela combinação de variáveis físico-ambientais e sociais. Clima, geologia, relevo e vegetação compõem as variáveis físicas e são relevantes quanto ao comportamento hidrológico da bacia, influenciando, dentre outros processos, a infiltração, o deflúvio, a evapotranspiração e os escoamentos superficial e sub-superficial (TONELO et al., 2006). Os diversos tipos de uso da

terra, tais como agropecuária, extrativismo ou indústria, representam as variáveis sociais e também exercem influência direta ou indiretamente nos processos hidrogeomorfológicos. Assim, tais variáveis interagem entre si, (re) modelando as formas e os processos ambientais na paisagem.

Dada a escala de análise, já que nela pode-se observar os elementos componentes e as diversas interações entre eles, a bacia hidrográfica é um recorte espacial satisfatório para pesquisas e ações de gerenciamento, pois consegue ter uma boa representatividade sistêmica em termos socioambientais. Diante disso, é reconhecida pela legislação brasileira, a partir da Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), como uma unidade ideal para o planejamento e a gestão territorial.

O manejo de uma bacia hidrográfica requer a sua compreensão morfométrica, analisando as interações entre formas e processos, do ponto de vista quantitativo, a partir de diversos parâmetros que possibilitam uma avaliação das dinâmicas ambientais. A partir desses parâmetros, torna-se possível identificar e qualificar as alterações ambientais e fazer uma análise da vulnerabilidade socioambiental, permitindo um planejamento mais eficaz para a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais (TONELLO et al., 2006).

A morfometria tem como fim a medição e a análise matemática da configuração da superfície terrestre, da forma e da dimensão do relevo. As características morfométricas na escala da bacia hidrográfica são importantes para explicar sua gênese e sua evolução já que todos os processos hidrológicos e geomórficos ocorrem dentro dela. A análise de parâmetros morfométricos fornece uma descrição quantitativa do sistema de drenagem e dá aporte na compreensão dos processos geomorfológicos, das propriedades físicas do solo e das características erosivas. Atualmente, a análise morfométrica de bacias hidrográficas conta com os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), que são uma ferramenta eficiente para a manipulação e a análise dessas informações espaciais (IQBAL; SAJJAD, 2014).

A rede de drenagem de uma bacia, seus padrões, formas e características morfométricas apontam o contexto geológico-geomorfológico e os processos morfoestruturais que a envolvem. Assim, a configuração hidrográfica é reflexo de sua estrutura geológica (litológica e tectônica), da evolução morfoгенética regional, do clima e das intervenções antrópicas.

A natureza das rochas sob ação de diferentes condições morfoclimáticas e agentes de erosão reflete suas propriedades geomorfológicas ou comportamentais (COUTO et al., 2011; CORDEIRO et al., 2024, OLIVEIRA et al., 2006).

A morfometria tem estudado as relações entre hidrografia e estrutura geológica inclusive na análise dos eventos tectônicos recentes, por meio de parâmetros associados aos canais fluviais e às redes de drenagem. O motivo é que os cursos de água são muito sensíveis às mudanças e reagem rapidamente a qualquer deformação na crosta terrestre, ainda que estas sejam ínfimas. Deste modo, alguns padrões podem indicar condicionamentos estruturais, como é o caso dos padrões treliça, retangular e paralelo, típicos no semiárido do Nordeste brasileiro (COUTO et al., 2011).

No caso do Nordeste setentrional brasileiro, grandes estruturas de deformação dúcteis e rúpteis de direção NE controlam a dinâmica de dissecação da paisagem. As direções predominantes do escoamento superficial expressam-se como lineamentos topográficos negativos de direção NE-SW e E-W, expressando um nítido controle estrutural (CORDEIRO et al., 2024; MAIA; BEZERRA, 2014).

Com base nas abordagens aqui explanadas, este trabalho foi executado na Bacia Hidrográfica do Rio Bastiões (BHRB), sul do estado do Ceará e parte do domínio do semiárido brasileiro. Seu principal objetivo foi caracterizar morfometricamente a área, apontando o papel das estruturas geológicas sobre a diversidade fluvial, a partir da identificação de controles fluviais geológicos que determinam as características e a dinâmica dos rios da região.

2. Materiais e métodos

A produção do material cartográfico foi feita por meio de geoprocessamento de dados, com a utilização do software ArcGIS 10.1. O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi gerado a partir das imagens de satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30m, disponíveis no site do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). Do MDE derivou-se o mapa das classes de declividade, que teve como base a classificação da

EMBRAPA (2006). Os dados geológicos foram obtidos junto à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2020), na escala de 1: 500.000.

Para a análise morfométrica da BHRB consideramos os seguintes parâmetros: Área (A), Perímetro (P), Comprimento da Bacia (L), Fator de Forma (Kf), Coeficiente de Compacidade (Kc), Índice de Circularidade (Ic), Coeficiente de manutenção (Cm), Densidade de drenagem (Dd), Densidade de rios (Dr), Comprimento do canal principal (Lp), Comprimento total dos canais (Lt) e Padrão de drenagem. A metodologia para o cálculo dos parâmetros é baseada nos trabalhos de Villela e Mattos (1975) e Christofoletti (1980).

A área de drenagem da bacia hidrográfica é medida em km² e o perímetro (P) é medido em km. Foram obtidos de forma bastante simples e automática através da ferramenta *Calculate Geometry* do ArcGIS.

Há algumas formas de se definir comprimento da bacia (L) o que pode resultar em valores um pouco diferentes para cada método. Dentre os métodos possíveis, utilizou-se aquele que mede a distância em linha reta, paralelamente (na medida do possível) ao canal principal.

A relação entre a largura média da bacia ($\bar{L}$) e o comprimento axial da bacia (L) pode ser chamada de fator de forma (Kf). Para esse cálculo utilizamos as seguintes fórmulas:

$$Kf = \frac{\bar{L}}{L} \quad ; \quad \bar{L} = \frac{A}{L} \quad ; \quad Kf = \frac{A}{L^2}$$

O coeficiente de compacidade (Kc) é a relação entre o perímetro da bacia (P) e o perímetro de um círculo de mesma área que a bacia, e é dado pela seguinte fórmula:

$$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

O índice de circularidade (Ic) é a relação entre a área da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro. A fórmula para obter esse índice segundo a proposta de Schumm (1956) é:

$$Ic = 12,57 \times \frac{A}{P^2}$$

O coeficiente de manutenção (C_m) proposto por Schumm (1956) tem como finalidade fornecer a área mínima necessária para manter um metro de canal de escoamento. Para o cálculo desse índice utiliza-se a seguinte fórmula:

$$C_m = \frac{1}{Dd} \cdot 1000$$

na qual Dd é a densidade de drenagem.

A densidade de drenagem (Dd) é um parâmetro expresso pela relação entre o comprimento total dos canais de uma bacia (L_t) e sua área total (A). É dada pela seguinte expressão:

$$Dd = \frac{L_t}{A}$$

A Densidade de rios (Dr) expressa a relação entre o número de cursos d'água (N) e a área da bacia (A) e tem por finalidade comparar a frequência de canais em uma área padrão como o quilometro quadrado, por exemplo. A Dr é obtida através da seguinte fórmula:

$$Dr = \frac{N}{A}$$

O comprimento do canal principal (L_p) e o comprimento total dos canais (L_t) são obtidos de forma bastante simples através do ambiente ArcGIS, especificamente com o uso das ferramentas *Calculate Geometry* e *Statistics*.

O padrão de drenagem é o arranjo espacial dos cursos fluviais e é definido neste trabalho a partir da análise visual da drenagem da bacia, comparando-a com os padrões de drenagem básicos apresentados por Christofolletti (1980).

Foi utilizado o MDE para extrair informações altimétricas e de acumulação de fluxo de pontos do canal principal e de dois grandes afluentes. O primeiro passo foi a extração e posterior correção de drenagem dos rios trabalhados. Isso foi feito através do *Google Earth Pro*. Em sequência, foram produzidas tabelas com informações sobre altimetria e acumulação de fluxo

(número de pixels), sendo os últimos dados posteriormente convertidos em área de captação efetiva (km²). Também foi feita a relação longitudinal entre o canal principal e as unidades geológicas dissecadas por ele.

Esses dados foram gerados a partir da ferramenta *Stack Profile*, do ArcGIS, associando os pontos do canal com os dados de altimetria e acumulação de fluxo do arquivo matricial. A ferramenta gera dados tabulares, que foram tratados em ambiente *Microsoft Excel*, gerando os perfis.

Foi construído ainda um gráfico com a relação entre o perfil longitudinal e o índice de energia de fluxo (*Stream Power Index-SPI*) do canal principal. O *stream power* é um indicativo de potencial de vazão de energia de fluxo em determinado trecho de rio e é expresso em *Watt* (W). Quando se encontra altos valores desse índice isso implica em melhores condições para o processo de erosão, por outro lado, menores valores significam maior tendência a processos deposicionais. Neste sentido, o *stream power* é uma das variáveis importantes no que concerne o padrão morfológico do canal (CAVALCANTE, 2018; RODRIGUES; SOUZA, 2020).

O SPI é construído a partir de atributos primários e secundários, como declividade, MDE, fluxo acumulado (*Flow Accumulation*) e índice de acumulação de fluxo (TWI) (RODRIGUES; SOUZA, 2020). De acordo com Rosa, Fredduzzi e Cencetti (2019) o *stream power* pode ser obtido através da seguinte fórmula:

$$\Omega = p \cdot g \cdot Q \cdot S$$

onde Ω é o *stream power*, p é a densidade da água, g é a força da gravidade, Q é a descarga e S é a declividade em graus.

O valor da descarga é obtido através da multiplicação entre velocidade do fluxo e área molhada, expressa da seguinte maneira:

$$Q = A \cdot U$$

onde A é a área molhada no vale fluvial e U é a velocidade do fluxo.

O cálculo desse índice ocorre a partir da multiplicação da densidade da água, normalmente 1.000 kg por metro cúbico (kg/m³), pela aceleração devida à gravidade, que é de 9,81 metros por segundo ao quadrado (m/s²) ao nível do mar. O produto desses dois números é 9.810 kg por metro quadrado (kg/m²). Posteriormente, esse resultado é multiplicado pela descarga

hidráulica do fluxo, e, por fim, o resultado é multiplicado pela inclinação do canal para obter a potência do fluxo (RODRIGUES, 2021).

Neste trabalho os dados utilizados foram da estação fluviométrica de nº 36125000 (Sítio Poço Dantas), disponíveis no Portal HidroWeb (ANA, 2020). Esta foi escolhida em virtude da sua localização na bacia, que se apresentou como a mais satisfatória por estar a cerca de 2 quilômetros do exutório do Rio Bastiões. Com os dados obtidos, foi feita a média da vazão de todos os anos disponibilizados na estação para o mês de março – pois, de modo geral, este é o mês que apresenta o maior índice pluviométrico. O resultado foi aplicado na fórmula descrita acima, permitindo chegar aos valores de *stream power* para vários segmentos do canal.

3. Caracterização da área

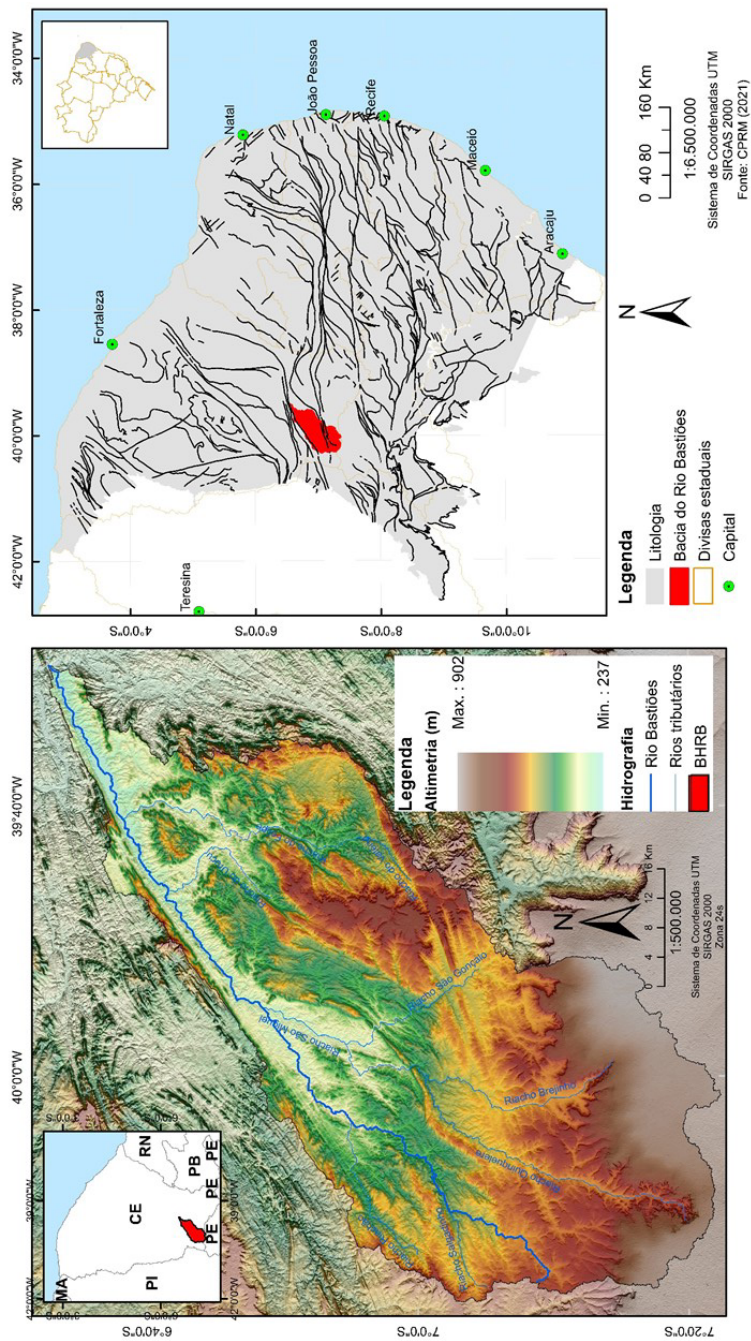
A Bacia Hidrográfica do Rio Bastiões está localizada na porção sul do estado do Ceará (figura 1-A) e faz parte da Bacia Alto Jaguaribe, sendo esta a maior das cinco subunidades que compõem a bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe (Alto, Médio e Baixo Jaguaribe, Banabuiú e Salgado), um dos mais importantes do estado (SANTANA, 2009).

Em termos mega-morfoestruturais a BHRB se insere no contexto geotectônico da Província Borborema (figura 1-B), enquadrada em maior proporção na Subprovíncia Setentrional. Dentre os terrenos tectono-estruturais, faz parte especificamente do terreno Jaguaribeano, sendo este pertencente ao Domínio Rio Grande do Norte (ALMEIDA et al., 1977; BRANDÃO; FREITAS, 2014; BRITO NEVES et al., 1995; MAIA; BEZERRA, 2014). O panorama geológico-geomorfológico regional que envolve a área é composto pelo domínio da Chapada do Araripe e da Depressão Sertaneja II (BRANDÃO; FREITAS, 2014).

A Depressão Sertaneja integra as depressões interplanálticas semiáridas, e é uma superfície de aplainamento (pediplanação), com relevo predominantemente suave ondulado, esculpida em vales estreitos com vertentes dissecadas. Elevações e cristas residuais marcam essa paisagem e testemunham os ciclos intensos de erosão que afetaram a região no passado (SÁ; RICHÉ; FOTIUS, 2004).

Figura 1

A: MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA BHRB NO ESTADO DO CEARÁ; B: LOCALIZAÇÃO DA BHRB NA PROVÍNCIA BORBOREMA



Fonte: modificada com base em SRTM e CPRM (2020).

Diante disso, a BHRB está numa região de dobramentos composta por um complexo de falhas, lineamentos e zonas de cisalhamento com direção preferencial NE-SW, com rochas bastante antigas, datadas do Proterozóico (ALMEIDA et al., 1977; BRITO NEVES et al., 1995; MAIA; BEZERRA, 2014). O embasamento cristalino se destaca espacialmente, enquanto as coberturas sedimentares mais expressivas estão associadas à Bacia Sedimentar do Araripe, ao sul, aos depósitos colúvio-eluviais (nas proximidades da Chapada do Araripe e no Maciço do Quincuncá) e aos depósitos aluvionares.

O clima da região é semiárido, caracterizado por irregularidade espaço-temporal pluviométrica, temperaturas médias anuais elevadas, baixa umidade relativa do ar e duas estações bem definidas: seca e chuvosa. A interação entre sistemas atmosféricos, como a ZCIT e o VCAS, aliada aos condicionantes ambientais locais, resulta em três tipos climáticos: Tropical Quente Semiárido (predominante), Tropical Quente Semiárido Brando (clima de transição) e Tropical Quente Subúmido (associado a fatores orográficos).

Na Chapada do Araripe, destacam-se os Latossolos Amarelos, associados ao relevo tabuliforme; e os Neossolos Litólicos e Argissolos Vermelhos, originados de rochas ígneas e metamórficas, nos terrenos cristalinos. As principais coberturas vegetais são a Caatinga do Cristalino, típica da Depressão Sertaneja, caracterizada por vegetação decídua espinhosa com árvores e arbustos pequenos em solos rasos e pedregosos, e a Caatinga do Sedimentar, que é decídua e não espinhosa, composta por arbustos, arvoretas e lianas. Outras unidades fitoecológicas presentes incluem a mata seca do sedimentar e do cristalino, além do cerrado e do cerradão interiores (AB'SABER, 1974; MORO et al., 2015; CAVALCANTI, 2016; CAVALCANTI; SANTOS, 2021). O uso da terra está essencialmente ligado à agropecuária extensiva, com cultivo de milho e feijão e criação de bovinos, ovinos, caprinos, suínos e aves, além do uso urbano em cidades de pequeno porte.

4. Resultados e discussão

A BHRB está localizada na margem esquerda do Rio Jaguaribe, fazendo parte da bacia do alto curso deste rio. O Rio Bastiões, canal principal de

7ª ordem na classificação de Strahler (1952), possui extensão de 141 km e direção de fluxo no sentido SO-NE. Alguns dos seus principais afluentes são os Riachos Quinquelerê, São Gonçalo, Brejinho e Riacho do Valério. A bacia apresenta porte médio com uma dimensão espacial de 3.568 km² e perímetro de 511,86 km², com um comprimento de cerca de 109 km, conforme sintetizado no quadro 1.

Quadro 1
PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO BASTIÕES

PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO BASTIÕES			
GEOMETRIA	Área (A)		3568 km ²
	Perímetro (P)		511,86 km
	Comprimento da bacia (L)		109 km
	Fator Forma (Kf)		0,30
	Coeficiente de compacidade (Kc)		2,39
	Índice de circularidade (Ic)		0,17
REDE DE DRENAGEM			
	Padrão de drenagem		Dendrítico, paralelo e treliça
	Hierarquia fluvial		7ª ordem
	Densidade de drenagem (Dd)		1,17 km/km ²
	Comprimento do canal principal (Lp)		145 km
RELEVO	Altitude máxima		902 m
	Altitude mínima		237 m
	Declividade	Plano – 0 a 3%	20% da área
		Suave ondulado - 3 a 8 %	32% da área
		Ondulado – 8 a 20%	35 % da área
		Forte ondulado – 20 a 45%	12% da área
		Montanhoso – 45 a 75%	0,8 % da área
		Escarpado - > 75%	0,009 % da área

Fonte: elaborado por Vanessa Martins Lopes.

A área possui amplitude altimétrica de 665 metros, sendo a menor cota de 237 metros, na foz do rio, e a maior cota, de 902 metros, no sul da bacia na região do topo da Chapada do Araripe (figura 1-A). Já o Rio Bastiões apresenta altitude inicial de 647 metros e de 237 metros em seu exutório, com um desnível total de 410 metros da nascente à foz.

Esse desnível aponta a existência de canais que exibem trechos de maior energia fluvial ou ainda rupturas de declive (*knickpoints*), que influenciam diretamente a dinâmica de processos erosivos e de transporte de sedimentos. Ao comparar uma bacia hidrográfica do rio Jaguaribe e outra ao sul da Chapada do Araripe, Oliveira et al. (2022) identificaram a maior presença dessas feições na parte norte, associadas ao relevo mais movimentado e declivoso.

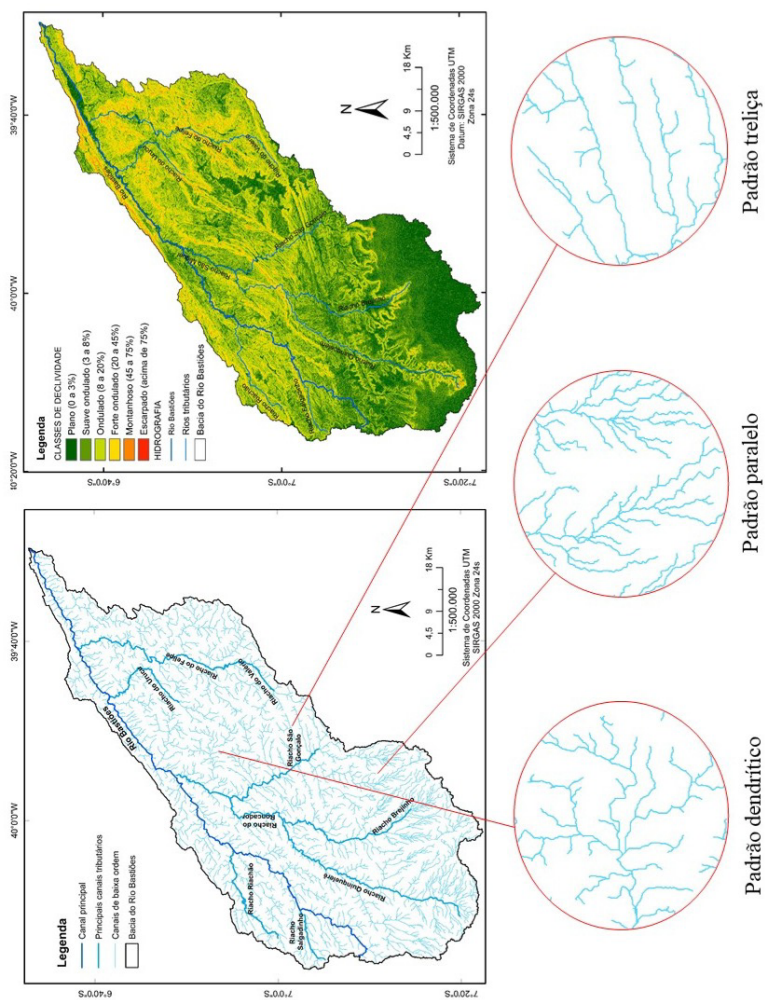
As classes de declividade influenciam diretamente em processos geomorfológicos, hidrológicos e nas diversas formas de uso da terra de uma bacia hidrográfica. Conforme quadro 1 e figura 2, a BHRB apresenta relevo predominantemente ondulado a suave ondulado, ou seja, cerca de 67% da área apresentando valores de declividade entre 3% e 20%. Esse padrão de relevo implica em uma erosão hídrica moderada, dependente de fatores como densidade da cobertura vegetal e tipos de uso da terra, conforme experienciado por Srinivasan et al. (2003), no semiárido paraibano. O estudo de uma bacia hidrográfica da face norte da Chapada do Araripe realizado por Oliveira et al. (2022) também corrobora que essa área possui relevo mais declivoso e movimentado, em comparação a face sul, com valores médios de 11%.

Nas áreas de relevo plano (20% da bacia) que correspondem em maior proporção à Chapada do Araripe, há maior infiltração e escoamento superficial reduzido, favorecendo a recarga de aquíferos, dada a litologia sedimentar porosa. Nos setores de relevo fortemente ondulado (12% da bacia), onde se destaca uma superfície dissecada em cristas, a erosão pode ser intensa, principalmente em áreas desmatadas ou com práticas inadequadas de uso da terra. Já as porções com declividade maior que 45% são altamente sensíveis à ocorrência de deslizamentos e instabilidade do solo, sob a ação de intervenções humanas ou chuvas intensas, no entanto, representam uma parcela muito pequena da área de estudo.

Observando os parâmetros morfométricos da BHRB, como fator forma (K_f) de 0,30, coeficiente de compacidade (K_c) de 2,39 e índice de circularidade (I_c) de 0,17, os valores indicam que a bacia possui forma mais estreita e alongada. Esses dados apontam uma menor propensão a picos de enchente na área, visto que o seu formato e seu tamanho colaboram para uma resposta mais lenta frente aos *inputs* hidrológicos.

Figura 2

A: REDE E PADRÕES DE DRENAGEM; B: CLASSES DE DECLIVIDADE DA BHRB



Fonte: modificada com base em SRTM.

A forma de uma bacia hidrográfica influencia o tempo de concentração do fluxo, ou seja, o tempo que a água leva para infiltrar ou escoar. Bacias circulares têm picos de fluxo mais altos e curtos, enquanto as alongadas apresentam picos menores e mais prolongados, pois seus afluentes se conectam ao canal principal em vários pontos, diferentemente das circulares, onde a concentração ocorre em um único local, reduzindo o tempo de concentração e aumentando o risco de enchentes (SINGH; GUPTA; SINGH, 2014). Além disso, em bacias alongadas, é menos provável que chuvas intensas ocorram simultaneamente em toda sua extensão (LORENZON et al., 2015). O tempo de concentração também é afetado pelo tipo de solo e pelo uso da terra: maior intervenção antrópica aumenta a erosão e o escoamento, reduzindo a infiltração e o tempo de concentração (LOPES; PINHEIRO, 2013).

A rede hidrográfica apresenta estreita relação com a geologia local, sendo seus padrões de drenagem influenciados pela estrutura geológica, resistência litológica e declividade do terreno (BASTOS; CORDEIRO, 2012; CHRISTOFOLETTI, 1980). Na área de estudo predominam três padrões (figura 2): o dendrítico, caracterizado por canais tributários que convergem em ângulos agudos, ocorre principalmente nas porções média e inferior da bacia, associado a litologias cristalinas homogêneas como o Plúton Campos Sales-Assaré (figura 3); o paralelo, com canais alinhados, desenvolve-se na porção sul sobre formações sedimentares da Bacia do Araripe, em áreas de vertentes íngremes; e o treliça, marcado por confluências em ângulos retos, é evidente no Riacho São Gonçalo, onde a drenagem é controlada por lineamentos e pela zona de cisalhamento Farias Brito, conforme evidenciado nos mapas de declividade (figura 2-B) e geológico (figura 3) (CHRISTOFOLETTI, 1980). Esses padrões refletem o controle estrutural na organização da rede de drenagem.

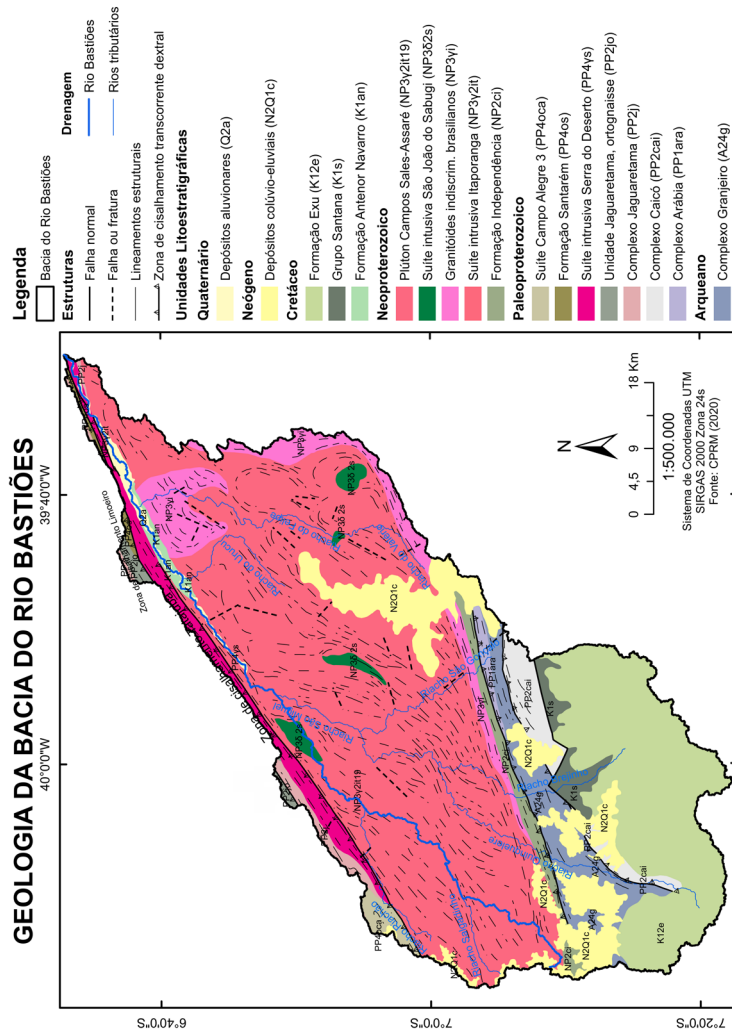
Se destaca a influência litológica sobre os padrões de drenagem, através da permoporosidade. Em termos gerais, assim como observado na BHRB, em terrenos cristalinos, a porosidade baixa limita o potencial hidrogeológico e condiciona um padrão de drenagem dendrítico. Em áreas sedimentares, a alta porosidade resulta, além da predominância de um relevo plano, na menor quantidade de rios e riachos e em padrões paralelos de drenagem (BASTOS; CORDEIRO, 2012).

A densidade de drenagem (Dd) correlaciona o comprimento total dos canais com a área da bacia. Para Villela e Mattos (1975) valores próximos a 0,5 km/km² são de bacias com drenagem pobre, e valores próximos a 3,5 ou mais são de bacias bem drenadas. A Dd é muito relevante na análise morfométrica, pois representa o grau de dissecação topográfica da bacia, já que o comportamento hidrológico das rochas repercute diretamente sobre esse parâmetro. A Dd, para além de condicionantes geológicos, pode ser influenciada por variações na topografia, solos, cobertura vegetal e atividades antrópicas (PEIXOTO et al., 2021).

Rochas de granulometria mais grosseira, que permitem maior infiltração, possuem menores valores de Dd e por consequência menor dissecação do relevo. Já rochas menos permeáveis, com granulometria mais fina, possuem maiores valores de Dd, pois, ao permitir um maior escoamento superficial, possibilitam igualmente uma maior esculturação de canais e dissecação da paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Na BHRB, a Dd é de 1,17 km/km² e denota que esta é medianamente drenada. Esse valor em muito difere daquele identificado por Silva (2017) para a Bacia do Alto Jaguaribe, que exibe um valor de 10,27 km/km², a caracterizando como muito bem drenada, devido à predominância de rochas cristalinas, que dificultam a infiltração e favorecem o escoamento superficial. Esses baixos valores para a Bacia do Rio Bastiões podem ser explicados pela proporção espacial da bacia sedimentar do Araripe dentro da área, que abrange cerca de 28% do seu território. Este pacote de sedimentos é um fator limitante para o aumento da densidade de drenagem local, pois a litologia mais permeável condiciona uma menor dissecação da paisagem. Isso também pode ser evidenciado nos estilos de rios presentes na região da Chapada do Araripe, onde os canais são marcados pela descontinuidade e pouca incisão, e há maior tendência à desconexão entre os compartimentos da paisagem, conforme identificado por Lopes (2023).

Figura 3
GEOLOGIA DA BHRB



Fonte: modificada com base em CPRM (2020).

O perfil longitudinal de um rio revela variações topográficas desde a nascente até a foz, destacando mudanças de altimetria e declividade essenciais para compreender os processos erosivos, sedimentares e a dinâmica fluvial (RODRIGUES; SOUZA, 2020). A inclinação controla a morfologia e o comportamento dos rios, com variações no gradiente frequentemente associadas a transições entre unidades de paisagem e estilos fluviais distintos (BRIERLEY; FRYIRS, 2006). Além disso, rupturas de declive e energia de fluxo influenciam significativamente a configuração dos canais fluviais (RODRIGUES; SOUZA, 2020; BRIERLEY; FRYIRS, 2006), permitindo correlacionar a geometria do canal com os processos geomorfológicos atuantes.

Observando-se o perfil longitudinal do Rio Bastiões (figura 4), percebe-se que em seu percurso, até aproximadamente o quilômetro 80, ele disseca quase exclusivamente rochas ígneas intrusivas (monzonito, granodiorito, granito e diorito) do Plúton Campos Sales - Assaré. Essa litologia condiciona os aspectos fisiográficos do seu alto curso, dando origem a superfícies mais dissecadas.

Ao longo de seu trajeto, esse canal exibe algumas rupturas de declive (*knickpoints*), compreendidas como anomalias de drenagem. Estas anomalias podem ser definidas como desvios locais da drenagem regional e/ou padrão de fluxo, de acordo com a estrutura regional e/ou topografia conhecida. Retilinearidade, surgimento abrupto e localizado de meandros e estreitamento anômalo de vales ou canais são alguns exemplos (HOWARD, 1967). A gênese dessas feições pode estar associada basicamente a três condicionantes: contraste litológico (a rocha mais resistente atua como uma soleira geomórfica), movimentos tectônicos (degrau gerado por uma falha com movimentação vertical relativamente recente) e retração erosiva a partir de um rebaixamento do nível de base (RESENDE; CASTRO, 2017; SILVA, 2017).

O Rio Bastiões em seu alto curso, apresenta duas rupturas de declive mais proeminentes (figura 4). Na primeira (ponto 1), por volta dos primeiros 12 quilômetros, há uma quebra de altitude de 45 metros em um segmento de 1,5 quilômetros. Na segunda (ponto 2), verificado em torno dos primeiros 20 quilômetros, a altitude cai 23 metros em um trecho de 1,5 quilômetros. Não há mudança na litologia dominante das áreas onde ocorrem tais quebras, apenas de unidade de paisagem no segundo

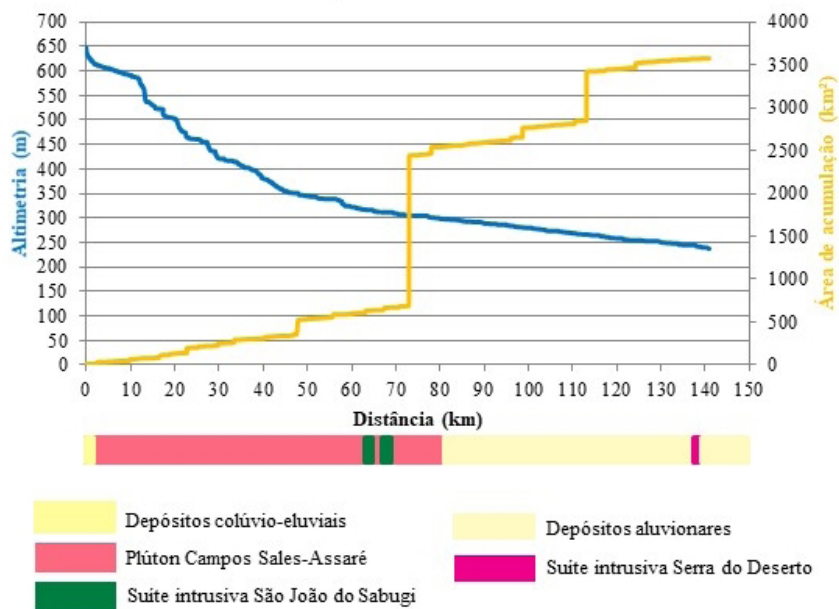
ponto (de uma superfície dissecada em colinas e morrotes para superfície dissecada em cristas, conforme mais bem detalhado por Lopes; Girão e Souza (2024). No entanto, em ambos os casos, esses *knickpoints* estão localizados entre lineamentos estruturais, indicando que sua gênese deve estar relacionada a tais estruturas.

Dada a resistência intempérica das rochas, cujo substrato é cristalino, estas unidades de paisagem, além de elevadas, são dissecadas e acidentadas. Isso é especialmente verdade na superfície dissecada em cristas, cuja declividade e dissecação é visivelmente maior, fato que interfere na morfologia e no comportamento do rio. Os estilos fluviais confinados e parcialmente confinados, controlados pelo substrato rochoso tendem a se encontrar nessas unidades. Além disso, por ser considerada a zona de produção e de maior energia de fluxo, as planícies tendem a ser ocasionais ou descontínuas e de menor proporção, se comparadas às planícies bem desenvolvidas de seu baixo curso.

Além dos *knickpoints*, o Rio Bastiões apresenta outras anomalias de drenagem, como, por exemplo, o desvio lateral abrupto em seu baixo curso (figura 5), que pressupõe forte controle tectônico. Cordeiro (2017) observou a presença de segmentos retilíneos que localmente mudam para suavemente sinuosos a meandantes abruptos, associando a sua origem possivelmente às falhas decorrentes do movimento transcorrente da zona de cisalhamento Tatajuba. Nessa área há a presença de meandros abandonados na planície aluvial que se encontram recobertos por vegetação e sugerem a ocorrência do processo de avulsão fluvial.

A área de acumulação total da bacia é de 3.568 km², e a entrada de afluentes vão ditar as mudanças no caráter e comportamento do rio. No quilômetro 73, a contribuição do maior tributário da bacia (Riacho São Miguel) eleva a área de acumulação de 680,57 km² para 2.434,16 km² (figura 4). Nota-se que a partir daí as planícies começam a ser contínuas e bem desenvolvidas, e o rio passa, um pouco mais a frente, a esculpir os depósitos aluvionares e não mais a litologia ígnea do Plúton Campos Sales-Assaré.

Figura 4
PERFIL LONGITUDINAL E ÁREA DE ACUMULAÇÃO DO RIO BASTIÕES



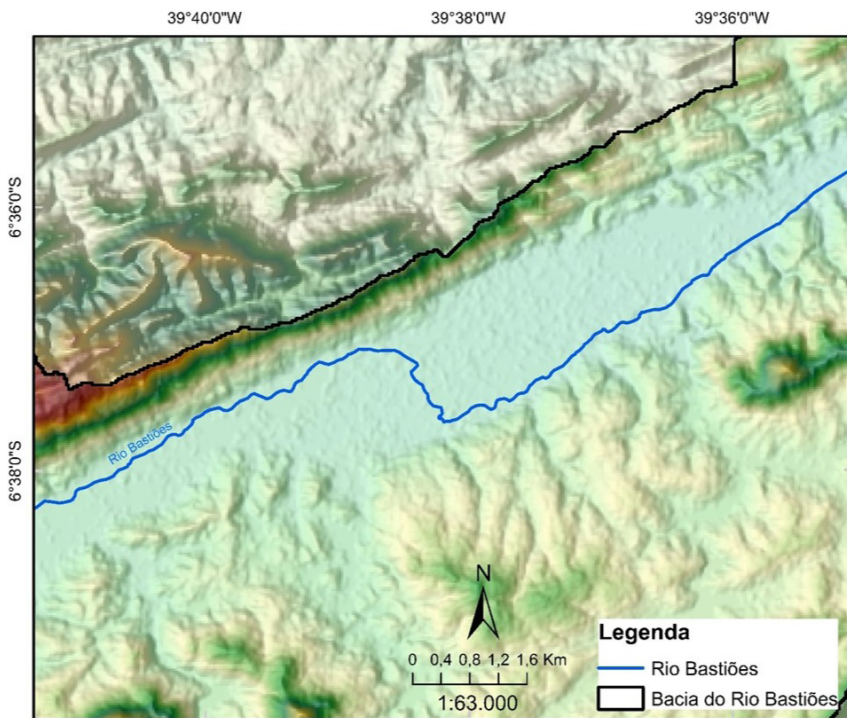
Visão em planta do rio Bastiões



Fonte: elaborada por Vanessa Martins Lopes.

Figura 5

ANOMALIA DE DRENAGEM NO BAIXO CURSO DO RIO BASTIÕES, COM MUDANÇA ABRUPTA DO CURSO FLUVIAL FORMANDO UM ÂNGULO ORTOGONAL

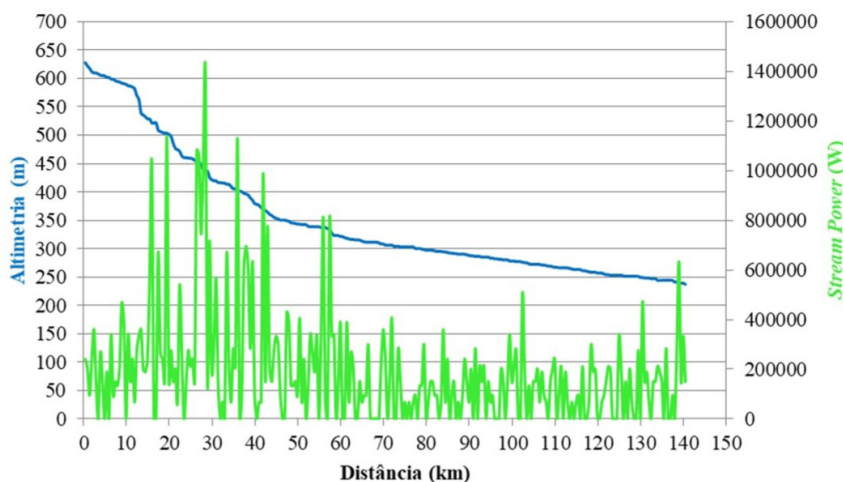


Fonte: modificada com base em SRTM.

Entre o quilômetro 98 – onde ocorre a confluência com o Riacho do Urucu, que altera a área de acumulação de 2.657,52 para 2.756,75 km² –, e o quilômetro 113 – onde a área de acumulação passa de 2.983,4 km² para 3.412,47 km², pela entrada do Riacho do Felipe, segundo maior tributário em termos de contribuição –, o Rio Bastiões percorre uma área de depósitos aluvionares que repousam sobre a Formação Antenor Navarro. Esta formação é composta por conglomerados e arenitos como o arco-seano, rico em feldspato e típico de terrenos graníticos e metamórficos rapidamente erodidos. A partir da confluência com o Riacho do Felipe, a área mostra claramente um caráter deposicional, visto o considerável alargamento da planície de inundação, em virtude do aumento da carga de sedimentos disponível.

A figura 6 apresenta a relação entre o perfil longitudinal do rio e o *stream power* (energia do rio) do Rio Bastiões. O *stream power* define a potência que um rio tem para a erosão vertical do seu leito e para o transporte de sedimentos a ele disponibilizados (PEIFER et al., 2022).

Figura 6
PERFIL LONGITUDINAL E *STREAM POWER* DO RIO BASTIÕES



Fonte: elaborada por Vanessa Martins Lopes.

Na figura 6, podemos observar que os maiores picos de energia se encontram nas áreas de altitude entre 550 e 350 metros, correspondentes em maior parte à superfície dissecada em colinas e morrotes e superfície dissecada em cristas, as quais, por sua maior declividade e gradiente do canal, têm um potencial natural para apresentar maior energia de fluxo. Isso significa, portanto, que, nesse trecho, há um maior potencial erosivo e de transporte de sedimentos, esculpindo canais mais definidos, evidenciados pela presença de estilos fluviais confinados ou parcialmente confinados identificados por Lopes (2023).

À medida que esse gradiente vai decrescendo, e o relevo se tornando plano e sem rupturas de declive, o *stream power* também diminui e estabiliza. A exceção são os pontos onde o rio recebe a entrada de outros pequenos afluentes, o que acentua localmente o seu poder energético. Assim, o final do setor médio e o baixo curso do Rio Bastiões se caracterizam pela menor

energia e por maior propensão a processos deposicionais, explícitos nas planícies aluviais mais largas e bem desenvolvidas desse setor.

5. Considerações finais

A análise morfométrica da BHRB e seu formato alongado e pouco compacto indicam que ela apresenta uma resposta hidrológica mais lenta frente a *inputs* e disseminação de mudanças, em comparação a bacias circulares. Em vista disso, em eventos de chuva intensa, a distribuição do escoamento superficial ocorre de forma gradual, o que reduz o risco de enchentes rápidas, mas que, no entanto, pode prolongar os períodos de cheia.

A configuração e a dinâmica hidrogeomorfológica da BHRB são condicionadas por fatores litoestruturais evidentes em alguns parâmetros como padrões e densidade de drenagem. A bacia sedimentar do Araripe abrange uma porção espacial significativa da área e altera padrões esperados para uma região semiárida como determinadas configuração de canais, taxas de escoamento e disponibilidade hidrogeológica. Além disso, controles tectônicos estão associados à presença de anomalias de drenagem da área, como *knickpoints* e mudanças abruptas no curso fluvial, o que também evidencia a influência estrutural e a importância da evolução geológica para a compreensão das paisagens atuais.

A partir dessa discussão, reitera-se a necessidade da análise morfométrica das bacias hidrográficas, especialmente de terras secas, como o semiárido brasileiro. Somente a partir da compreensão de padrões hidrológicos e geomorfológicos específicos de cada região, será possível uma avaliação mais precisa e, por consequência, uma gestão de bacias hidrográficas mais eficaz e alinhada às necessidades e especificidades de cada área.

Notas

- 1 O trabalho contou com a colaboração do professor Jonas Otaviano Praça de Souza.

Referências

- AB'SABER, A. N. O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras. **Geomorfologia**, n. 43, p. 1-39, 1974.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **HIDROWEB**. Brasília. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 5 abr. 2024.
- ALMEIDA, F. F. M et al. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., Campina Grande, 1977. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Geologia, 1977. p. 363-391.
- BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R. R; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**, v. 2, 2000. p. 187-200.
- BASTOS, F. H. CORDEIRO, A. M. N. Fatores naturais na evolução das paisagens no semiárido brasileiro: uma abordagem geral. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 5, p. 464-476, 2012.
- BRANDÃO, R. L.; FREITAS, L. C. B. **Geodiversidade do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2014.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 28 mar. 2024.
- BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; JAIN, V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. **Area**, v. 38, n. 2, p. 165-174, 2006.
- BRITO NEVES, B. B. et al. O evento Cariris Velho na Província Borborema: integração de dados, implicações e perspectivas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 4, p. 279-296, 1995.
- CAVALCANTE, A. A. Geomorfologia fluvial no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia** (Recife), v. 35, n. 4, p. 254-268, 2018.
- CAVALCANTI, L. C de S.; SANTOS, R. S. Domínio das Caatingas: considerações a partir de uma cartografia comparada. In: SOUZA, S. O. et al. **Perspectivas e desafios do sertão nordestino**. v. 1. Senhor do Bonfim: UNIVASF, 2021.
- CAVALCANTI, L. C. S. Geossistemas do Semiárido Brasileiro: considerações iniciais. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 2, p. 214-228, 2016.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. Editora Blucher, 1980

CORDEIRO, A. M. N. et al. Condicionamento litoestrutural da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Piranhas-açu, Nordeste do Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 25, n. 97, p. 120-138, 2024.

CORDEIRO, A. M. N. **Morfoestrutura e morfopedologia da serra do Quincuncá e entorno, Ceará, Brasil**. 2017. 251f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2017.

COUTO, E. V.; MANIERI, D. D.; MANOSSO, F. C.; FORTES, E. Correlação morfoestrutural da rede de drenagem e lineamentos da borda planáltica, Faxinal, Paraná. **Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 315-326, 2011.

CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Escala 1:500.000. Fortaleza: 2020. Disponível em: <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

HOWARD, A. D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. **AAPG bulletin**, v. 51, n. 11, p. 2246-2259, 1967.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto Topodata**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/> Acesso em: 04 jun. 2019.

IQBAL, M.; SAJJAD, H. Watershed prioritization using morphometric and land use/land cover parameters of Dudhganga Catchment Kashmir Valley India using spatial technology. **J Geophys Remote Sens**, v. 3, n. 115, p. 2169-0049.1000115, 2014.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. **Hidrologia de Matas Ciliares**. 2000. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/informacoestecnicas/hidrologia_de_matas_ciliares.aspx.

LOPES, J. W. B.; PINHEIRO, E. A. R. Análise temporal da conectividade e da capacidade de transporte potencial de sedimentos em meso-bacia semiárida, CE, Brasil. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 136-144, 2013.

LOPES, V. **Análise da conectividade da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Bastiões (BHRB)-Ceará**. 2023. 175f. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

LOPES, V. M.; GIRÃO, O.; SOUZA, J. O. P. Diversidade físico-geográfica no semiárido nordestino: unidades de paisagem na Bacia do Rio Bastiões, Ceará (Brasil). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 44, p. 1-17, 2024.

LORENZON, A. S. et al. Influência das características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Benevente nas enchentes no município de Alfredo Chaves-ES. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, p. 195-206, 2015.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R. Condicionamento estrutural do relevo no Nordeste setentrional brasileiro. **Mercator** (Fortaleza), v. 13, p. 127-141, 2014.

MORO, M. F. et al. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, v. 66, p. 717-743, 2015.

OLIVEIRA, J. G. et al. Caracterização de relevo por meio de indicadores morfométricos nas faces norte e sul da Chapada do Araripe-nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 42, p. 1-14, 2022.

OLIVEIRA, J. D. et al. Características geológicas e geomorfológicas e sua influência na espacialização da rede de drenagem na bacia do Rio Branco, Mato Grosso, Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA - SINAGEO, 11., Maringá-PR, 2006. **Anais...** Maringá-PR, 2006.

PEIFER, D. et al. Bases teóricas do modelo stream-power de incisão fluvial. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 2, p. 1512-1523, 2022.

PEIXOTO, F. S. et al. Caracterização hidrológica e do uso e cobertura da Terra no alto curso da bacia hidrográfica do rio do Carmo-RN/Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, p. 138-158, 2021.

REZENDE, E. A.; CASTRO, P. T. A. Análise do perfil longitudinal do alto/médio Rio Grande-MG: gênese de rupturas de declive e distribuição de registros sedimentares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17., Campinas, 2017. **Anais...** Campinas, 2017. v. 1, p. 6064-6075.

RODRIGUES, J. M. **Modificações geomórficas nos estilos fluviais da bacia do alto curso do Rio Piranhas, semiárido paraibano**. 2021. 106f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

RODRIGUES, J. M.; SOUZA, J. O. P. Parâmetros de controle de estilos fluviais na bacia hidrográfica do alto curso do rio Piranhas, semiárido paraibano. **Caderno de Geografia**, v. 30, n. 62, p. 650-650, 2020.

ROSA, P.; FREDDUZZI, A.; CENCETTI, C. Stream power determination in gis: an index to evaluate the most 'Sensitive' points of a river. **Water**, v. 11, n. 6, p. 1145, 2019.

SÁ, I. B.; RICHÉ, G. R.; FOTIUS, G. A. As paisagens e o processo de degradação do semi-árido nordestino. In: SILVA, J. M. C. et al. (Ed.) **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Universidade Federal de Pernambuco, 2004. p.18-36.

SANTANA, E. W. **Caderno regional da sub-bacia do Alto Jaguaribe**/Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza: INESP, 2009.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological society of America bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.

SILVA, M. B. **Geomorfologia e controle estrutural da rede de drenagem do alto curso do Rio Jaguaribe, Ceará**. 2017. 153f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SINGH, P.; GUPTA, A.; SINGH, M. Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 17, n. 2, p. 111-121, 2014.

SRINIVASAN, V. S. et al. Erosão hídrica do solo no semi-árido brasileiro: a experiência na bacia experimental de Sumé. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 57-73, 2003.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological society of America bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.

TONELLO, K. C. et al. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões-MG. **Revista Árvore**, v. 30, p. 849-857, 2006.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.

Recebido em 31/05/2025

Aceito em 23/06/2025