



**CARACTERIZAÇÃO HIDROMORFOLÓGICA DA MICROBACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO QUIXUDI NO ESTADO DA PARAÍBA:
ESPACIALIZAÇÃO E ANÁLISE EM AMBIENTE SIG**

*HYDROMORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE QUIXUDI
RIVER MICRO-WATERSHED IN THE STATE OF PARAÍBA:
SPATIALIZATION AND ANALYSIS IN A GIS ENVIRONMENT*

*CARACTERIZACIÓN HIDROMORFOLÓGICA DE LA MICROCUENCA
HIDROGRÁFICA DEL RÍO QUIXUDI EN EL ESTADO DE PARAÍBA:
ESPACIALIZACIÓN Y ANÁLISIS EN UN ENTORNO SIG*

Lázaro Avelino de Sousa

*Universidade Federal de Campina Grande
lazaroavelino@hotmail.com*

Sérgio Murilo Santos de Araújo

*Universidade Federal de Campina Grande
sergiomurilosa.ufcg@gmail.com*

Conflitos de interesses, filiação institucional e responsabilidades

Os autores declaram não haver interesses conflitantes.

Afiliações Institucionais são informadas pelo(s) autor(es) e de inteira responsabilidade do(s) informante(s).

O(s) autor(es) é(são) responsável(is) por todo o conteúdo do artigo, incluindo todo tipo de ilustrações e dados.

Recebido em: dez./2024

Aceito em: fev./2025



Resumo

O rio Quixudi é um rio temporário, ou efêmero, tributário do rio Taperoá, localizado no agreste do Estado da Paraíba, no nordeste do Brasil. Nessa região de clima semiárido, a irregularidade do regime de chuvas torna imprevisíveis as cheias e inundações, fazendo desse tipo de rio uma ameaça em caso de eventos extremos de precipitação. Providencialmente, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico classifica a bacia do rio Quixudi como área susceptível a inundação. Partindo dessa premissa este trabalho verificou, por meio de processamento digital de dados secundários em ambiente SIG, os atributos do meio físico que afetam essa condição de susceptibilidade a inundação, tendo como objetivo apresentar um diagnóstico situacional acerca das características hidromorfológicas da microbacia. A importância deste estudo está em oferecer elementos para gestão territorial da bacia no âmbito socioambiental e político. Os softwares livres HEC-HMS e QGIS foram utilizados para o processamento digital dos dados e para a elaboração dos mapas temáticos. Utilizou-se como dado espacial o Modelo Digital de Elevação NASADEM 30 m. A hierarquia fluvial foi feita pelo modelo de Strahler. A classificação do relevo, pelo método da Embrapa. O tempo de concentração foi calculado pelo método de Kirpich. Os resultados mostraram que as características do meio físico da microbacia afetam sua condição de susceptibilidade a inundação de diferentes maneiras, ambas condicionadas pela ocorrência de eventos climáticos extremos, muito mais que pela morfologia da bacia.

Palavras-chave

Bacia hidrográfica. Susceptibilidade a inundação. Morfometria.

Abstract

The Quixudi river is a temporary or ephemeral river, a tributary of the Taperoá river, located in the Agreste region of the State of Paraíba, in northeastern Brazil. In this semi-arid climate region, the irregularity of the rainfall regime makes floods and inundations unpredictable, making this type of river a threat in the event of extreme precipitation events. Providentially, the National Water and Basic Sanitation Agency classifies the Quixudi river basin as a flood-prone area. Based on this premise, this study examined, through the digital processing of secondary data in a GIS environment, the physical environment attributes that influence this flood susceptibility condition, aiming to present a situational diagnosis of the hydromorphological characteristics of the micro-watershed. The importance of this study lies in providing elements for the territorial management of the basin in socio-environmental and political contexts. The open-source software HEC-HMS and QGIS were used for digital data processing and thematic map development. The NASADEM 30 m Digital Elevation Model was used as spatial data. The river hierarchy was determined using the Strahler model. The relief classification followed the Embrapa method. The concentration time was calculated using the Kirpich method. The results showed that the physical characteristics of the micro-watershed affect its flood susceptibility condition in different ways, both primarily influenced by extreme climatic events rather than the watershed's morphology.

Keywords

Watershed. Flood susceptibility. Morphometry.

Resumen

El río Quixudi es un río temporal o efímero, afluente del río Taperoá, ubicado en la región del Agreste en el estado de Paraíba, en el noreste de Brasil. En esta región de clima semiárido, la irregularidad del régimen de lluvias hace impredecibles las crecidas e inundaciones, convirtiendo a este tipo de río en una amenaza en caso de eventos extremos de precipitación. Providencialmente, la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico clasifica la cuenca del río Quixudi como una zona susceptible a inundaciones. Partiendo de esta premisa, este estudio verificó, mediante el procesamiento digital de datos secundarios en un entorno SIG, los atributos del medio físico que afectan esta condición de susceptibilidad a inundaciones, con el objetivo de presentar un diagnóstico situacional sobre las características hidromorfológicas de la microcuenca. La importancia de este estudio radica en ofrecer elementos para la gestión territorial de la cuenca en los ámbitos socioambiental y político. Se utilizaron los programas de código abierto HEC-HMS y QGIS para el procesamiento digital de los datos y la elaboración de mapas temáticos. Se utilizó como dato espacial el Modelo Digital de Elevación NASADEM de 30 m. La jerarquía fluvial se determinó utilizando el modelo de Strahler. La clasificación del relieve siguió el método de Embrapa. El tiempo de concentración se calculó mediante el método de Kirpich. Los resultados mostraron que las características del medio físico de la microcuenca afectan su condición de susceptibilidad a inundaciones de diferentes maneras, ambas influenciadas principalmente por la ocurrencia de eventos climáticos extremos, mucho más que por la morfología de la cuenca.

Palabras clave

Cuenca hidrográfica. Susceptibilidad a inundación. Morfometría.



Introdução

O planejamento ambiental e a gestão dos recursos naturais requerem uma abordagem sistêmica dos processos ambientais verificáveis dentro de um recorte territorial. Nesse sentido, “a bacia hidrográfica é considerada uma unidade territorial ideal para diversos estudos ambientais” (Amorim; Piroli, 2020, p. 88), uma vez que “integra uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nela desenvolvidas, *configurando-se como um sistema geomorfológico aberto, que recebe matéria e energia através de agentes climáticos e perde através do deflúvio [itálicos nossos]*” (Falcão, 2020, p. 23-24).

No cerne do que se entende por bacia hidrográfica — um “conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes” (Guerra e Guerra, 2008, p. 76) — a rede hidrográfica e a dinâmica hidrológica são determinantes para a delimitação e para a configuração ambiental dessas unidades territoriais, tendo ligação direta com o aspecto climático da região onde se localiza a bacia. Diante disso, não se pode cogitar o estudo ambiental de uma bacia hidrográfica sem considerar as mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global e suas implicações na intensificação dos eventos meteorológicos extremos.

O sexto relatório do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC), intitulado *Climate Change 2021: the Physical Science Basis*, publicado em 09 de agosto de 2021, aponta que o aquecimento global provocado pela emissão de gases do efeito estufa pelos seres humanos está contribuindo para o aumento tanto da probabilidade quanto da severidade do calor extremo, da precipitação, das secas e dos ciclones tropicais. Segundo o documento, as mudanças projetadas nos extremos são maiores em frequência e intensidade, e prevê-se que os eventos de chuvas extremas se tornem mais frequentes e tragam uma quantidade significativa e crescente de água quando forem atingidos. Eventos extremos compostos — aqueles que ocorrem próximos uns dos outros ou ao mesmo tempo — aumentaram a chance de ocorrência desde 1950 com as interferências do homem sobre o clima (IPCC, 2021a, pp. 10-11, 19, 21-22).

Em ficha técnica suplementar, o mesmo relatório do IPCC prevê com grau médio de confiança que o avanço do aquecimento global para próximo dos 2°C — como já está



em curso — “aumentará a intensidade e a frequência das precipitações extremas e das inundações pluviais no nordeste da América do Sul”, bem como assegura com alta confiança “um aumento dominante na duração das secas” para esta região do globo (IPCC, 2021b, p. 2).

No Brasil, a maior parte da Região Nordeste já convive com eventos de seca devido ao clima Tropical Semiárido. A mais nova delimitação desta zona climática ocupa 71,28% do território nordestino, segundo *shapefile* disponibilizada pelo Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (Lapis, 2024). Trata-se de uma zona de “forte insolação, temperaturas relativamente altas e regime de chuvas marcado pela escassez, irregularidade e concentração das precipitações em um curto período de três a quatro meses” (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 2021, p. 8). Os dias secos, segundo mapeamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002), somam de seis a oito meses por ano, com pontos críticos que chegam a ficar de nove a onze meses sem chuva. Diante disso, a drenagem das bacias hidrográficas é composta majoritariamente por canais efêmeros, tributários de rios intermitentes.

Neste cenário, a intensificação dos eventos climáticos extremos representa risco de catástrofe ambiental, não só pela insegurança hídrica das secas prolongadas, mas pela relativa imprevisibilidade dos desastres hidrometeorológicos: “aqueles deflagrados por chuvas prolongadas ou por episódios de chuvas excepcionais e concentradas” (Moura *et al.*, 2016, p. 260). Estas últimas, de acordo com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden, 2019), são difíceis de serem previstas com antecedência satisfatória para envio de alertas. Neste caso, um volume hídrico acima da capacidade de drenagem da rede hidrográfica, precipitado em um curto espaço de tempo, pode acarretar diversos impactos, a exemplo de desastre por inundação, ou seja, “submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água, em zonas que normalmente não se encontram submersas” (Souza *et al.*, 2022, p. 374).

Exemplifica essa situação o fato ocorrido no Estado do Rio Grande do Sul em maio de 2024, quando um evento extremo de precipitação inundou várias cidades, deixando um saldo de 600 mil pessoas desalojadas, 800 pessoas feridas e 150 óbitos (Paiva *et al.*, 2024).



Providencialmente, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) mapeou trechos de cursos d'água inundáveis em todo o território nacional no período de 2011 a 2014, e classificou-os quanto ao grau de impacto, vulnerabilidade e frequência de ocorrência de inundações. O mapeamento identificou mais de 13 mil trechos inundáveis em 2.780 cursos d'água do País. Só no Estado da Paraíba são 160 trechos de cursos d'água nesta condição, dentre os quais o trecho formado pelo rio Quixudi e seu principal afluente — o riacho do Espinheiro.

Situado no Agreste semiárido do Estado da Paraíba, o rio Quixudi é um rio temporário (ou efêmero) tributário do rio Soledade, que pertence a sub-bacia do rio Taperoá — principal afluente do rio Paraíba. Apesar de sua dinâmica hidrológica temporária, “que apenas flui durante períodos curtos, em resultado direto da precipitação” (Ferreira, 2023, p. 2), o rio Quixudi está incluído no Atlas de Vulnerabilidade a Inundações (ANA, 2014) como um trecho de curso d'água susceptível a inundações, com frequência de ocorrência baixa, porém, com grau médio de impacto e vulnerabilidade.

O trecho assim classificado origina-se no riacho do Espinheiro, no município de São Vicente do Seridó, e estende-se latitudinalmente (de nordeste a sul-sudoeste) até o município de Soledade, onde conflui com o rio Quixudi (advindo do Oeste) e segue em curso longitudinal decrescente (rumo ao sudeste) até desembocar no rio Soledade. A área de captação desses dois canais de drenagem forma o que aqui se denomina de microbacia do rio Quixudi.

A susceptibilidade de baixa frequência — intervalos de mais de dez anos sem registro de inundações — atribuída pela ANA (2014) a este trecho de rio é, supostamente, a causa da negligência do risco de desastre hidrometeorológico que o mesmo representa enquanto canal de drenagem efêmero. Tal risco reside exatamente na transitoriedade de seu regime hidrológico, que propicia a ocupação de suas áreas de várzea de forma desordenada durante o período seco. Essa situação se verifica, sobretudo, no trecho do rio que permeia a área urbana do município de Soledade, onde se constata a ocupação de trechos do leito maior por currais, pocilgas e capinzais, além do avanço das construções civis sobre as margens mais críticas do rio, sendo este o motivo do grau de impacto médio que lhe é atribuído, ou seja, “a capacidade de causar danos razoáveis a serviços essenciais, instalações e obras de infraestrutura públicas e



residenciais” (ANA, 2014, p. 7), resultando num grau de vulnerabilidade também definido como médio.

No contexto das mudanças ambientais provocadas pelo aquecimento global, a premissa da susceptibilidade da microbacia do rio Quixudi a inundação é reforçada pela constatação da intensificação de eventos pluviométricos extremos no nordeste da América do Sul e do Brasil, respaldando o interesse desta pesquisa em analisar as condições hidromorfológicas da referida bacia mediante esta ameaça. Justifica esta abordagem o fato de que o trecho de rio em questão já foi atingido por uma enxurrada de grandes proporções no ano de 1985, resultando em inundação na área urbana do município de Soledade, conforme relato de Sousa, Silva e Araújo (2022).

Em resumo, o problema que se tem é que a bacia hidrográfica em questão é uma bacia de drenagem efêmera, susceptível a inundação, que converge para área urbana e é bastante antropizada, suscitando a hipótese de que a intensificação dos eventos extremos de precipitação decorrentes do aquecimento global seja um agravante de sua dada condição de susceptibilidade a inundações ao interagir com fatores do meio físico da bacia. Assim, supõe-se que os graus de impacto e vulnerabilidade que caracterizam a susceptibilidade da referida microbacia a inundação podem ser afetados ou potencializados — para além da dinâmica pluviométrica local — pela ocorrência de chuvas extremas associadas aos atributos do meio físico da bacia, especialmente às características morfométricas da rede de drenagem.

Convenientemente, a vulnerabilidade dos ambientes em função de suas características físicas pode ser avaliada a partir de análises integradas por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Segundo Rodrigues (2023), o SIG possui grande capacidade para acessar e integrar diferentes níveis de informações (vetoriais, *raster*, dados de campo, etc.), permitindo a apresentação e associação dos dados de diferentes formas (tabelas, gráficos e mapas temáticos) e possibilitando a análise espacial integrada dessas informações. Nesse processo, a modelagem espacial por meio de sensoriamento remoto e geoprocessamento em ambiente SIG se constitui numa alternativa eficiente para a análise ambiental em bacias hidrográficas, sobretudo no aspecto hidromorfológico.

Nesse contexto, este trabalho se propôs a verificar, por meio de processamento digital de dados secundários em ambiente SIG, os atributos do meio físico que afetam a



condição de susceptibilidade da microbacia do rio Quixudi a inundações, tendo como objetivo apresentar um diagnóstico situacional acerca das características hidromorfológicas da microbacia.

Material e Métodos

Delimitação e Localização da Microbacia

A delimitação da microbacia do rio Quixudi foi realizada através dos *softwares* livres QGIS (*Quantum Geographic Information System*) versão 3.22 e HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's – Hydrologic Modeling System*) versão 4.9. Ambos são Sistemas de Informação Geográfica que permitem modelar e mapear as características do ambiente físico de forma integrada, seja a partir de dados coletados em campo, ou a partir de dados secundários.

Para modelar a bacia foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) NASADEM (NASA JPL, 2021), com resolução espacial de 30 metros, adquirido através do *plugin Open Topography DEM Downloader* associado ao QGIS. Utilizou-se como referência espacial para baixar o MDE o contorno da bacia do rio Soledade, extraído do arquivo GeoPackage das bacias Ottocodificadas de nível cinco da ANA, disponível na Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO, 2017) (ANA, 2012).

Ainda no QGIS, o arquivo MDE em formato Tiff foi reprojeto para o sistema de coordenadas planas SIRGAS 2000 UTM Zona 24 Sul, para que se pudesse obter dados métricos da bacia através do HEC-HMS.

No HEC-HMS foi feita a delimitação da microbacia e a extração da rede de drenagem. Primeiro fez-se uma correção no MDE através do comando *Preprocess Sinks*, que identifica qual é a quantidade de preenchimento que é necessário para mover a água de célula para célula no terreno representado no MDE, preenchendo seus vazios. Depois, utilizou-se o comando *Preprocess Drainage*, para gerar a direção do fluxo (*Flow Direction*) entre as células do MDE e também o número de células a montante que estão drenando para um ponto de jusante (*Flow Accumulation*). Em seguida, com o comando *Identify Streams*, identificou-se os cursos d'água ou canais de drenagem de acordo com área mínima estabelecida de 1 km² para uma maior riqueza de detalhes. Feito isso,

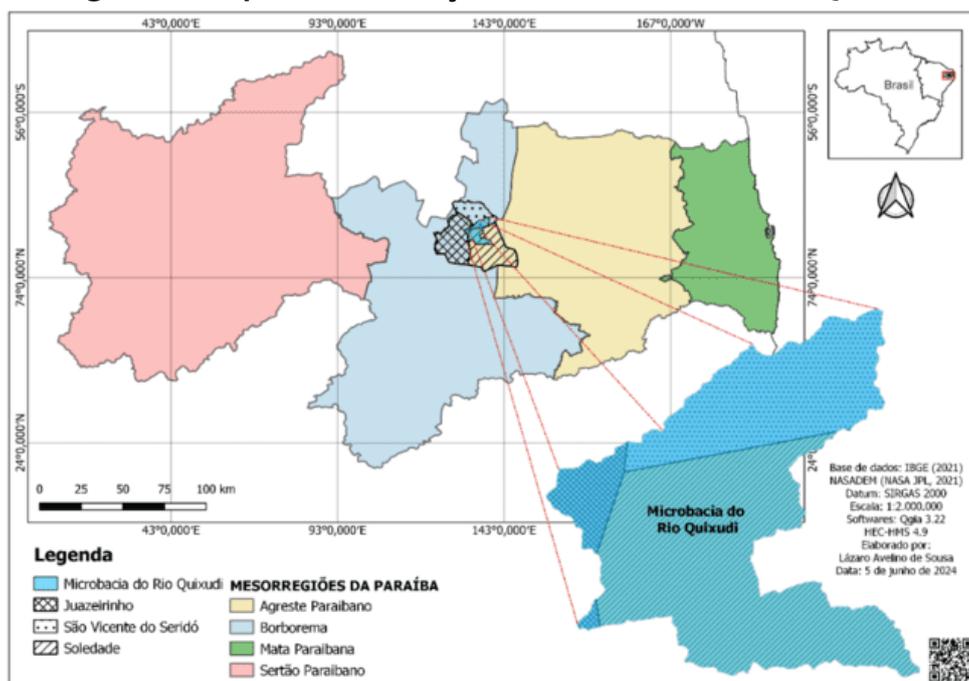
determinou-se o *break point*, indicando na imagem o exutório do rio Quixudi e, por último, com o comando *Deliniate Elements*, o *software* delimitou automaticamente a microbacia sobre o MDE. Dentro dos limites da microbacia o *software* gerou automaticamente três áreas de contribuição que foram nomeadas de AC1, AC2 e AC3.

Depois de delimitada a bacia, seus contornos e sua rede de drenagem foram exportados em formato *shapefile* para serem trabalhados novamente no QGIS. A área e o perímetro da microbacia serão descritos adiante, na análise morfométrica.

A localização da microbacia abrange o território de três municípios pertencentes às mesorregiões da Borborema e do Agreste Paraibano, sendo 2,3% do município de Juazeirinho e 17,7% do município de São Vicente do Seridó — na mesorregião da Borborema — e 14,5% do município de Soledade — na mesorregião do Agreste. O clima nesta região é classificado como BSh, semiárido de estepe, de baixa latitude e altitude. As temperaturas na região giram em torno de 18° C em dias de inverno e 30° C no verão. A umidade relativa do ar varia de 20% a 82% ao longo do ano. O período chuvoso é de verão a outono, tendo início em fevereiro e estendendo-se até maio (USP,2021).

O mapa da Figura 1 traz a localização da microbacia do rio Quixudi em relação aos três municípios e às mesorregiões estaduais da Paraíba.

Figura 1 - Mapa de localização da microbacia do Rio Quixudi



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)



Hierarquia Fluvial e Morfometria

A classificação hierárquica da rede de drenagem foi feita segundo o método de Strahler (1952), através do qual verificou-se o número total de canais da microbacia, assim como o total de canais de cada ordem. Por este método,

os menores canais, sem tributários, são considerados como de primeira ordem, estendendo-se desde a nascente até a confluência; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e de primeira ordens; os canais de quarta ordem surgem da confluência de dois canais de terceira ordem, podendo receber tributários das ordens inferiores. E assim sucessivamente. (Christofoletti, 1974, p. 106-107).

O canal principal da microbacia foi definido pela magnitude, ou seja, pela quantidade de nascentes ou de canais de primeira ordem que lhes são tributários. A caracterização morfométrica contemplou a análise linear da rede de drenagem, depois a análise areal da microbacia e, por fim, a análise altimétrica.

Utilizando-se das ferramentas “Estatística Zonal” e “Calculadora de Campo” do QGIS, obteve-se, a partir do MDE, a área da microbacia (km²); o perímetro (km); o comprimento do canal principal (km); o comprimento do equivalente vetorial — canal principal desconsiderando os meandros (km); o comprimento de todos os canais (km); o comprimento do Eixo axial — soma do comprimento do equivalente vetorial com a distância da sua nascente ao divisor topográfico mais remoto (km); a altimetria mínima, máxima e média (m); e a amplitude altimétrica máxima (m). Todos estes valores métricos foram utilizados para calcular os parâmetros morfométricos descritos no Quadro 1.

Quadro 1- Parâmetros utilizados na análise morfométrica da microbacia do Rio Quixudi

Nº	Parâmetro	Equação	Descrição	Unidade	Fonte
1	Comprimentos médios dos canais (L _m)	$L_m = \frac{L_u}{N_u}$	L _m = Comprimento médio dos canais; L _u = Comprimento dos canais de uma dada ordem; N _u = Número de canais da mesma ordem.	m	Horton (1945)
2	Extensão do percurso	$E_{ps} = \frac{1}{2 \times D_d}$	E _{ps} = Extensão do percurso	km	Christofoletti (1980)

	superficial (Eps)		superficial; Dd = Densidade de drenagem.		
3	Sinuosidade do canal principal (Sin)	$S_{in} = \frac{R_p}{L_{Rp}}$	Sin = Sinuosidade do canal principal; Rp = Comprimento do rio principal; Lpr = Comprimento do equivalente vetorial.	Km·km ⁻¹	Schumm (1963)
4	Frequência dos canais (Fr)	$F_r = \frac{N_u}{N_t} \times 100$	Fr = Frequência dos canais; Nu = Número de canais de uma dada ordem; Nt = Número total de canais.	%	Horton (1945)
5	Razão de bifurcação (Rb)	$R_b = \frac{N_u}{N_u + 1}$	Rb = Razão de bifurcação; Nu = Número de canais de uma dada ordem; Nu + 1 = Número de canais de ordem imediatamente superior acrescido de 1.	-	Horton (1945)
6	Densidade de drenagem (Dd)	$D_d = \frac{C_r}{A}$	Dd = Densidade de drenagem; Cr = Comprimento total dos rios da bacia; A = Área da bacia.	Km·km ⁻²	Horton (1945)
7	Densidade hidrográfica (Dh)	$D_h = \frac{N_t}{A}$	Dh = Densidade hidrográfica; Nt = Número total de canais; A = Área da bacia.	canais·km ⁻²	Christofolletti (1969) <i>apud</i> Souza <i>et al.</i> (2021)
8	Coefficiente de compacidade (Kc)	$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Kc = Coeficiente de compacidade; P = Perímetro da bacia; A = Área da bacia	-	Villela e Mattos (1975) <i>apud</i> Rodrigues <i>et al.</i> (2013)
9	Fator de forma (Kf)	$K_f = \frac{A}{L^2}$	Kf = Fator de forma; A = Área da bacia; L = Eixo axial.	-	Villela e Mattos (1975) <i>apud</i> Rodrigues <i>et al.</i> (2013)
10	Índice de circularidade (Ic)	$I_c = 12,57 \frac{A}{P^2}$	Ic = Índice de circularidade; A = Área da bacia; P = Perímetro da bacia.	-	Villela e Mattos (1975) <i>apud</i> Rodrigues <i>et</i>



					al. (2013)
11	Coeficiente de manutenção (Cm)	$C_m = \frac{1}{D_d} \times 1000$	Cm = Coeficiente de manutenção; Dd = Densidade de drenagem.	$m^2 \cdot m^{-1}$	Christofoletti (1980)
12	Razão de Textura (T)	$T = \frac{N_t}{P}$	T = Razão de textura; Nt = Número total de canais da bacia; P = Perímetro da bacia.	-	Smith (1950) <i>apud</i> França (1968)
13	Tempo de Concentração (Tc)	$T_c = 57 \times \left(\frac{L^2}{S}\right)^{0,385}$	Tc = Tempo de concentração; L = Comprimento do talvegue (km); S = declividade equivalente do talvegue (m/km).	minutos	Kirpich (1940) <i>apud</i> Mostarda Neto (2018)
14	Gradiente do canal principal (GP)	$GP = \frac{A_{cp}}{C_{cp}} \times 100$	GP = Gradiente do canal principal; Acp = Diferença de altitude ao longo do curso d'água principal; Ccp = Comprimento do rio principal.	%	Horton (1945)
15	Razão de Relevo (Rr)	$R_r = \frac{\Delta H}{L'}$	Rr = Razão de relevo; ΔH = Amplitude altimétrica máxima; L' = Comprimento do eixo axial.	-	Strahler (1964)
16	Índice de Rugosidade (Ir)	$I_r = \Delta H * D_d$	Ir = Índice de rugosidade; ΔH = Amplitude altimétrica; Dd = Densidade de drenagem.	-	Christofoletti (1969) <i>apud</i> Souza <i>et al.</i> (2021)

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Os mapas de altimetria e declividade foram produzidos no QGIS a partir do Modelo Digital de Elevação NASADEM. O mapa hipsométrico foi confeccionado reclassificando o *raster* MDE através do algoritmo *r.recode* do sistema GRASS GIS, convertendo-o de um *raster* contínuo para um *raster* discreto, onde as altitudes máximas e mínimas foram representadas por cores quentes e frias respectivamente. Já o mapa da declividade foi gerado automaticamente pelo QGIS a partir do MDE, optando-se pela declividade expressa em porcentagem. A partir da declividade, classificou-se o relevo da



microbacia de acordo com os parâmetros de classificação da Embrapa (1979), que considera o percentual de inclinação zenital do terreno em relação ao plano para criar as classes de relevo. Para isso o *raster* com a declividade foi reclassificado através do comando “Reclassificar por Tabela”, onde os percentuais de declividade foram agrupados em classes que foram nomeadas de acordo com a norma da Embrapa.

A declividade equivalente do canal principal foi calculada de acordo com a equação (1), proposta por Taylor e Schwarz (1952) *apud* Borsato (2005, p. 105), na qual, a declividade de cada trecho do canal (D_i) foi obtida da relação entre o valor do desnível entre as extremidades de cada trecho i e o comprimento do respectivo trecho.

$$D_i = \frac{\Delta H_i}{L_i} \quad D_{eq} = \left(\frac{\sum L_i}{\sum \left(\frac{L_i}{\sqrt{D_i}} \right)} \right)^2 \quad (1)$$

Onde: D_{eq} = declividade equivalente (adimensional); L_i = comprimento horizontal de cada trecho i (km); D_i = declividade de cada trecho i (m/m); ΔH_i = desnível entre as extremidades de cada trecho i (m).

O valor total da declividade equivalente foi utilizado na fórmula de Kirpich, adotada para calcular o tempo de concentração (T_c) da microbacia, conforme indicado por Mostarda Neto (2018, p. 34). O método de Kirpich foi adotado por ser o mais amplamente utilizado na literatura para o estudo de bacias rurais de médio e grande porte. Embora sua validade teórica requeira sua aplicabilidade precípua em bacias de no máximo 0,45 km², estudos de Silveira (2005) *apud* Sampaio *et al.* (2016), mostraram que este método também funcionou bem para bacias entre 153 e 11.162 km².

Os valores de referência para a análise morfométrica, bem como para a classificação do relevo da microbacia, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de referência para classificação dos parâmetros morfométricos e do relevo da microbacia.

Parâmetro	Unidade	Formato da bacia	Limite	Classe
Índice de Sinuosidade ¹	Adimensional	-	0 a 1,0	Canais Retilíneos
		-	1,0 a 2,0	Canais Transicionais
		-	>2,0	Canais Sinuosos
Razão de Textura ²	Adimensional	-	< 2,5	Grosseira
		-	2,5 a 6,2	Média
		-	> 6,2	Fina
Coeficiente de Compacidade ³	Adimensional	Redonda	1,00 a 1,25	Alta tendência a enchentes
		Ovalada	1,25 a 1,50	Tendência média a enchentes
		Oblonga	1,50 a 1,70	Baixa tendência a enchentes
		Comprida	>1,70	Tendência a conservação
Fator de Forma ³	Adimensional	Redonda	1,00 a 0,75	Alta tendência a enchentes
		Ovalada	0,75 a 0,50	Tendência média a enchentes
		Oblonga	0,50 a 0,30	Baixa tendência a enchentes
		Comprida	< 0,30	Tendência a conservação
Índice de Circularidade ³	Adimensional	Redonda	1,00 a 0,80	Alta tendência a enchentes
		Ovalada	0,80 a 0,60	Tendência média a enchentes
		Oblonga	0,60 a 0,40	Baixa tendência a enchentes
		Comprida	< 0,40	Tendência a conservação
Densidade de Drenagem ⁴	Km/km ²	-	< 1,50	Baixa
		-	1,50 a 2,50	Média
		-	2,50 a 3,00	Alta
		-	> 3,00	Super alta
Densidade Hidrográfica ⁵	Nº de Rios/km ²	-	< 3	Baixa
		-	3 a 7	Média
		-	7 a 15	Alta
		-	>15	Muito alta
Tempo de Concentração ¹	Minutos	-	< 6 horas	Curto, Rápido (inundações bruscas)
		-	> 6 horas	Longo, Lento (inundações graduais)
Índice de Rugosidade ¹	Adimensional	-	0 a 150	Fraca
		-	151 a 550	Média
		-	551 a 950	Forte
		-	> 950	Muito forte
Razão de Relevo ⁷	Adimensional	-	0 a 0,1	Baixa
		-	0,11 a 0,30	Média
		-	0,31 a 0,60	Alta
Classificação do Relevo ⁸	Declividade (%)	-	0 a 3	Plano
		-	3 a 8	Suave Ondulado
		-	8 a 20	Ondulado
		-	20 a 45	Forte Ondulado
		-	45 a 75	Montanhoso

Fonte: ¹Azambuja e Conceição (2024); ²França (1968); ³Villela e Mattos (1975) *apud* Rodrigues *et al.* (2013); ⁴Horton (1945), Strahler (1975) e França (1968) *apud* Rodrigues *et al.* (*op. cit.*); ⁵Lollo (1995) *apud* Santos *et al.* (2012); ⁷Piedade (1980) *apud* Rodrigues *et al.* (*op. cit.*); ⁸Embrapa (1979)



Resultados e Discussão

Análise linear

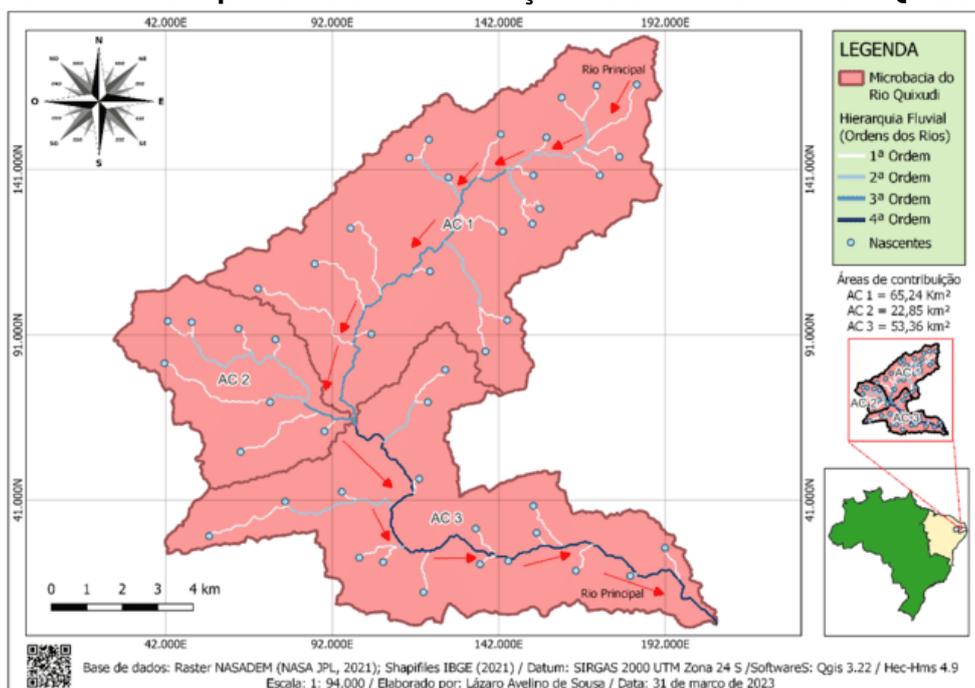
Com área equivalente a 141,5 km² e perímetro de 84,3 km, a microbacia do rio Quixudi comporta um total de 90 canais de drenagem distribuídos em três áreas de contribuição, sendo duas de 3^a ordem e uma de 4^a ordem. Estas áreas foram denominadas de AC1, AC2 e AC3, sendo que o rio principal nasce na AC1 e deságua na AC3, que também recebe as águas da AC2 no ponto de confluência entre as três áreas de contribuição.

Os limites da microbacia, sua subdivisão em áreas de contribuição e sua rede de drenagem com indicação das nascentes estão representados no mapa da Figura 2, onde se tem a classificação hierárquica dos canais de drenagem segundo o método de Strahler (1952). Nota-se que o rio principal — indicado no mapa pelas setas vermelhas — não se enquadra em apenas uma ordem de classificação, tendo sido definido pela magnitude, ou seja, pelo número de nascentes ou canais de primeira ordem que lhes são tributários, isto porque, se considerado o critério da distância entre o exutório e a nascente mais remota, o rio principal seria o trecho que segue para noroeste do exutório, contemplando a AC2. A hierarquia fluvial está detalhada na Tabela 2, onde se observa também a razão de bifurcação e a frequência dos canais.

A bacia é do tipo endorréica com padrão de drenagem dendrítica, em que “as correntes tributárias distribuem-se (*ipsis litteris*) em todas as direções sobre a superfície do terreno, e se unem formando ângulos agudos de graduações variadas, mas sem chegar nunca ao ângulo reto” (Christofolletti, 1980, p. 103).

No tocante à frequência dos canais (Fr), predomina na bacia os canais de 1^a ordem, com 51,1%. Isto indica que metade da drenagem da bacia concentra-se nas áreas de relevo mais acentuado, favorecendo a formação de nascentes.

Figura 2 - Mapa da classificação hierárquica da rede de drenagem e da distribuição das nascentes por área de contribuição na microbacia do rio Quixudi



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do método de Strahler, 1952 (2024).

Tabela 2 - Hierarquia fluvial da microbacia do rio Quixudi

Ordem	Quantidade de canais	Extensão (km)	Razão de bifurcação (adimensional)	Frequência de canal (%)	Comprimento médio (m)
1ª	46	53,71	2,42	51,1	1,17
2ª	18	21,44	1,29	20,0	1,19
3ª	13	13,02	0,93	14,4	1,00
4ª	13	17,03	0,14	14,4	1,31
Total	90	105,20	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Distribuindo-se as nascentes e as ordens dos canais por área de contribuição da microbacia tem-se o que se vê na Tabela 3, onde a AC1 concentra o maior número de nascentes, enquanto a AC3 conta com o maior número de canais de 4ª ordem.

Apesar do grande número de nascentes, quando se observa a razão de bifurcação (Rb) na microbacia como um todo, os baixos valores registrados em todas as ordens, com média de 1,19, indicam uma tendência à conservação, ou seja, uma baixa propensão à erosão. Isto se reflete no comprimento médio dos canais, que não ultrapassa 1,31 m. De acordo com Dornellas *et al.* (2020, p. 608), “a razão de bifurcação representa o número de canais de uma ordem necessários para formar um canal de ordem superior”. Assim, na microbacia do rio Quixudi essa razão é quase de um para um.

Tabela 3 – Distribuição das nascentes e das ordens dos canais por área de contribuição

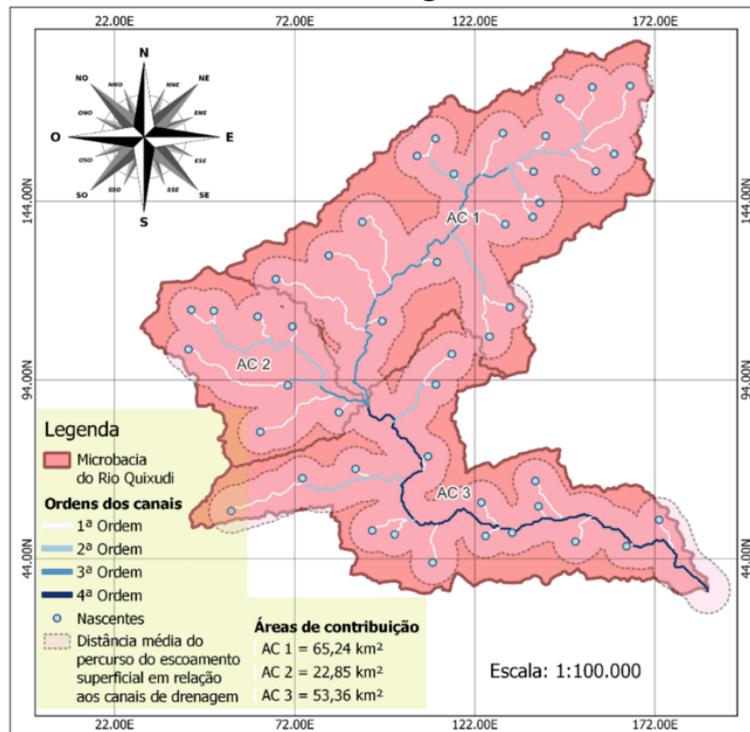
Área de Contribuição	Extensão Territorial (km ²)	Número de Nascentes	Número de Canais de 2 ^a ordem	Número de Canais de 3 ^a ordem	Número de Canais de 4 ^a ordem
AC1	65,2	21	10	10	0
AC2	22,9	8	4	3	0
AC3	53,4	17	4	0	13
Total	141,5	46	18	13	13

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Ainda na análise linear da rede de drenagem o canal principal registrou um comprimento total, da nascente à foz, de 33,75 km. O equivalente vetorial registrou 28,17 km. A distância entre a nascente principal e o divisor topográfico mais remoto registrou 1,38 km. Com isso, o eixo axial da bacia totalizou 29,55 km de comprimento. O comprimento de todos os canais somou 105,20 km. Com isso, a extensão do percurso superficial (Eps) foi de 0,67 km, significando que a água da chuva precipitada na bacia percorre uma distância média de 670 m na vertente até encontrar um canal para escoamento permanente. Para representar essa distância no terreno, foi gerado um *buffer* com a Eps em relação aos canais de drenagem (Figura 3).

A Eps tem influência sobre o tempo de concentração (Tc) da bacia, que é definido como “o tempo necessário para que a água que caiu no ponto mais distante chegue até o exutório da bacia” (Targa *et al.*, 2012, p. 125). Assim, tem-se por óbvio que quanto maior for a Eps, maior será o Tc da bacia e, por consequência, menor será a tendência de alagamentos e inundações. O Tc da microbacia do rio Quixudi será discutido no âmbito da análise altimétrica. Porém, a distância registrada para a Eps já indica que o Tc na bacia deve ser longo, condizente com inundações graduais. Isto se percebe na Figura 3, onde se observa que a linha pontilhada do *buffer* se aproxima dos contornos da bacia, chegando a ultrapassá-los em alguns pontos. Isto significa que os 670 m da Eps representam quase que a totalidade dos vertedouros da bacia. Isto se comprova pela área ocupada pelo *buffer* dentro da microbacia, que registrou 106,6 km², ou 75,3% da área.

Figura 3 - Mapa da extensão média do percurso superficial em relação aos canais de drenagem



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

No tocante ao índice sinuosidade (Is), Nardini *et al.* (2013) *apud* Silva *et al.* (2018, p. 248) explicam que este índice “relaciona o comprimento verdadeiro do canal (em projeção ortogonal) à distância vetorial (comprimento em linha reta) entre os dois extremos do canal principal”. Dummer e Verdum (2023, p. 3) afirmam que “a sinuosidade dos canais é influenciada pela carga de sedimentos, pela compartimentação litológica, pela estruturação geológica e pela declividade”. Assim, a sinuosidade é uma característica que “está relacionada à velocidade do escoamento nos canais de drenagem e, em síntese, sua relação com o solo em produzir erosão” (Azambuja; Conceição; Pereira, 2021, p. 16). Segundo estes autores, quanto maior for a sinuosidade, maior será a dificuldade de o fluxo de água atingir o exutório do canal, por tanto, a velocidade de escoamento será menor.

No caso em tela, o Is registrou 1,20 km·km⁻¹, significando que o canal principal da microbacia é do tipo transicional, ou seja, há trechos com sinuosidade moderada contrastando com trechos mais retilíneos. No trecho formado pela AC1 o canal tem 16,72 km de extensão, sendo mais curto que o canal do trecho formado pela AC3, que tem 17,03 km. Ambos esses trechos, quando analisados separadamente, registraram o mesmo valor de sinuosidade do rio principal, ao passo que na AC2 o Is registrou 1,31



km·km⁻¹ para um comprimento de canal de apenas 8,35 km de extensão, sendo este, portanto, o trecho mais curto e mais sinuoso de todos. Moura *et al.* (2023), estudando a sub-bacia do rio Taperoá — que envolve toda a área de estudo aqui abordada — encontraram Is de 1,45 km·km⁻¹, significando que este rio é mais sinuoso que o Quixudi, mas também é do tipo transicional. Azambuja, Conceição e Pereira (*op. cit.*), afirmam que áreas drenadas por canais com essas características são mais favoráveis à conservação e à preservação das bacias.

Em resumo, a análise linear da microbacia do rio Quixudi mostrou uma bacia de 4ª ordem, com sinuosidade transicional, baixa razão de bifurcação e extensão do percurso superficial relativamente longa. Essa morfologia da drenagem, aliada a Eps, indicam que, em condições normais de precipitação, a microbacia é pouco susceptível a inundação, dado o comprimento longo do canal principal, sua sinuosidade transicional — que alterna a velocidade do fluxo — além da Eps longa em relação ao tamanho da bacia. No entanto, em caso de eventos extremos de precipitação, pode ocorrer inundação na AC3, pois esta área recebe as águas da AC1 e da AC2, que possuem rios de terceira ordem e contam juntas com o maior número de nascentes. Dessa forma, percebe-se que a configuração física da microbacia tem pouca influência sobre sua susceptibilidade a inundação, ficando esta susceptibilidade a cargo de anormalidades no campo meteorológico. Isso já fica implícito na classificação da ANA, quando estabelece que a susceptibilidade é de baixa frequência de ocorrência, por se tratar de um rio temporário.

Análise areal

No tocante a análise areal, o coeficiente de compacidade (Kc), o fator de forma (Kf) e o índice de circularidade (Ic), calculados com base em Villela e Mattos (1975), mostraram que a microbacia do rio Quixudi tem o formato comprido com tendência à conservação. Segundo esta referência, o Kc relaciona a forma da bacia com a forma de um círculo de área equivalente, sendo que, quanto mais próximo de 1 for o coeficiente, mais arredondada é a bacia, e, por consequência, mais propensa a inundação. Já o Kf é dado pela razão entre a área e o quadrado do comprimento axial da bacia, resultando num valor adimensional geralmente menor que 1, que seria o fator de uma bacia totalmente redonda. Assim, quanto mais próximo de 1 for o valor do Kf, mais



arredondada é a bacia, e quanto menor o valor, menos arredondada é a bacia. O índice de circularidade, por sua vez, é obtido da relação entre o perímetro e a área da bacia. Este índice, assim como o coeficiente de compacidade, tende para 1 conforme a forma da bacia se aproxima da forma circular, e diminui à medida que a forma for mais alongada.

O Kc na microbacia do rio Quixudi registrou o valor de 1,99 (adimensional); o Kf registrou 0,16 e o Ic 0,25, também em valores adimensionais. Estes valores confirmam o formato comprido e a tendência a conservação da bacia, ou seja, a área de captação é drenada por uma rede hidrográfica longilínea, onde a extensão média do escoamento superficial é relativamente longa, havendo pouca atividade erosiva e maior tendência a infiltração.

Lopes *et al.* (2022) estudaram a microbacia do Açude Grande, de formato similar à do rio Quixudi, localizada no município de Caraúbas-RN, na qual encontraram valores de 1,86 para o Kc, 0,59 para o Kf e 0,28 para o Ic. Estes valores, segundo os autores, condizem com uma bacia alongada e, como tal, com baixa propensão a enchentes e inundações.

No caso da microbacia do rio Quixudi, o formato alongado ou comprido da bacia é uma característica física que reforça a afirmativa de que a condição de susceptibilidade que lhe é atribuída é fruto da ocorrência excepcional de precipitações, pois, em bacias com esse formato a influência da morfologia sobre as inundações é mínima, uma vez que o tempo de concentração é maior do que nas bacias arredondadas.

Ainda na análise areal, os cálculos da Densidade de drenagem (Dd) e da Densidade hidrográfica (Dh) tiveram como referência Horton (1945), França (1968) Strahler (1975) e Lollo (1995), conforme indicado na legenda da Tabela 1. Segundo estas referências, a Dd é extraída da relação entre o comprimento total dos canais de drenagem da bacia com sua respectiva área. Já a Dh resulta da relação entre o número de seguimentos de canais de drenagem e a área da bacia.

Na microbacia do rio Quixudi a Dd registrou 0,74 km de canal por km² de área, sendo considerada uma densidade baixa. Já a Dh registrou o número de 0,64 canais por km², também sendo considerada baixa. Isto significa que o escoamento superficial na bacia é alto, pois há poucos e curtos trechos de rios por quilômetro quadrado de área. O coeficiente de manutenção (Cm) de 1.344,7 m²·m⁻¹ condiz com os baixos valores de densidade registrados. Este índice, de acordo com Schumm (1956), fornece a área



mínima necessária para a manutenção de um metro de canal de escoamento, no caso em tela, mais de mil metros quadrados.

As baixas densidades de drenagem e hidrográfica registradas na microbacia do rio Quixudi favorecem, teoricamente, a infiltração da água da chuva na bacia, uma vez que a extensão do percurso superficial é relativamente longa. Porém, quando se observa uma razão de textura (T) de 1,07 (adimensional) registrada na bacia, percebe-se uma textura grosseira, típica de ambientes com rochas maciças e resistentes, o que interfere na capacidade de infiltração. Com isso, “o escoamento superficial é mais intenso e provoca, conseqüentemente, maior dissecação hídrica do terreno, aspecto similar ao de ravinas” (Campanharo 2010, p. 26).

Na vizinha bacia do Alto Paraíba, com uma área mais de 40 vezes maior do que a do Quixudi, Dornellas *et al.* (2020) registraram uma Dd igual à da nossa área de estudo, e uma Dh 40,6% menor. Isto implica que naquela bacia os valores de densidade também são baixos, porém, os rios são mais longos, embora sejam menos numerosos por quilômetro quadrado de área do que na bacia do rio Quixudi. Os referidos autores afirmam que esses valores baixos de Dd e de Dh são típicos de regiões semiáridas.

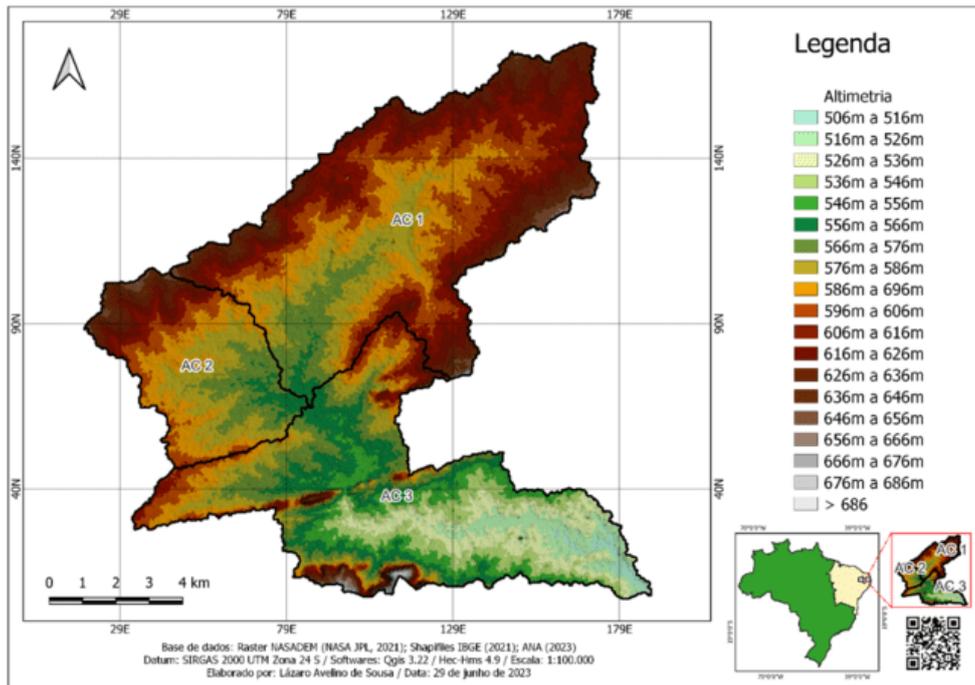
Em suma, a análise areal da microbacia aponta que, apesar de ser uma bacia de forma comprida com tendência a conservação, a condição de susceptibilidade a inundação pode ser afetada pelas baixas densidades de drenagem e hidrográfica. Isso implica que, em caso de eventos extremos de precipitação, o escoamento superficial aumentado sobre uma textura grosseira pode conduzir ao acréscimo repentino de água nos rios, potencializando os alagamentos e inundações.

Análise altimétrica

No âmbito da análise altimétrica, o mapeamento hipsométrico mostrou um relevo praticamente plano, com altimetria variando entre 506,0 m e 690,0 m, resultando numa amplitude altimétrica máxima de 184,0 m. Por isso, para uma melhor visualização, o mapa da Figura 4 traz o relevo sombreado em 3D, cotado de dez em dez metros.

As maiores elevações ficam no extremo sul da microbacia, compreendendo parte da Serra das Melancias, no município de Soledade. A menor cota altimétrica constitui o exutório do rio Quixudi, na mesma latitude da referida serra.

Figura 4 - Mapa hipsométrico da microbacia do Rio Quixudi

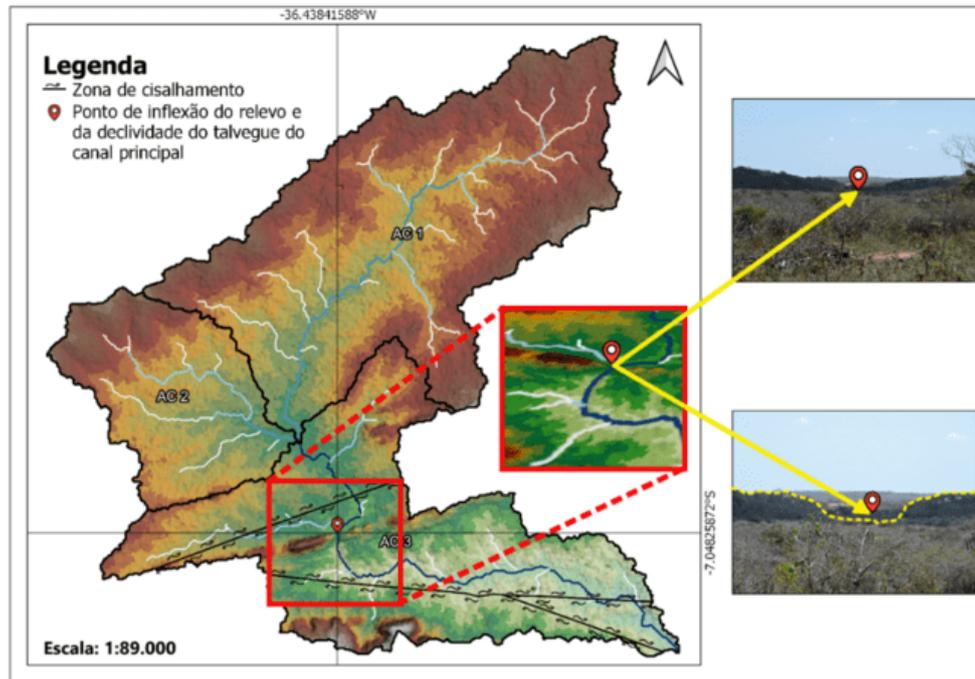


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Nota-se que a amplitude altimétrica máxima está concentrada na AC3, causando uma notável diferença no relevo desta área em relação às outras duas áreas de contribuição. Essa diferença é marcada por uma zona de cisalhamento que atravessa a AC3 longitudinalmente, a cerca de 2 km do ponto de confluência entre as três áreas de contribuição. Nesta zona localiza-se um ponto de inflexão — de coordenadas - 7.04825872°S e -36.43841588°W — onde há uma saliência topográfica que separa a parte mais alta da bacia (ao sul) da parte mais baixa (ao norte) (Figura 5). Neste ponto o rio principal encontra uma passagem por entre as elevações e, após cruzar esta zona, sofre uma queda brusca de 21 m em seu talvegue para poder assim continuar seu curso rumo ao exutório. No destaque do retângulo vermelho na Figura 5 tem-se um recorte em 3D do ponto de inflexão, onde se observa a descida do rio principal por entre as saliências da topografia. Fotografias do local ilustram as elevações topográficas permeadas pelo rio.

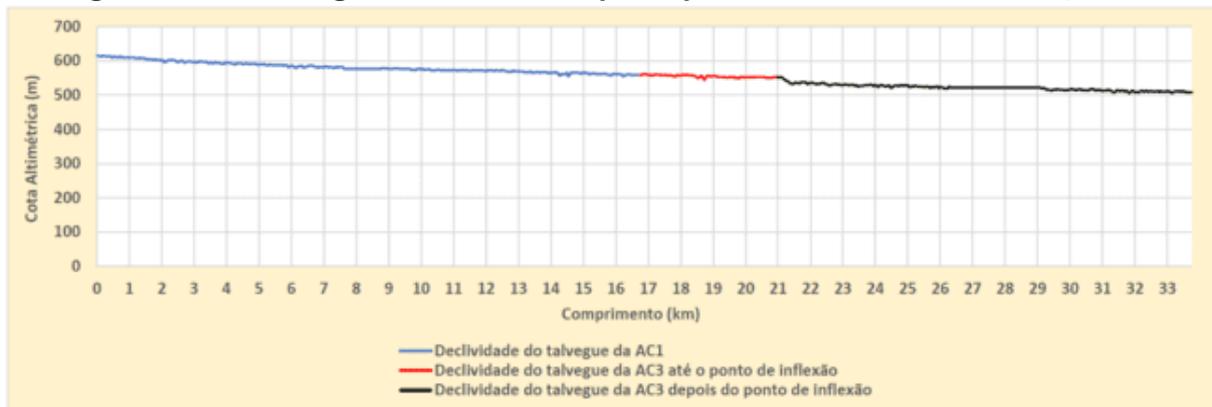
No perfil longitudinal do canal principal (Figura 6) fica clara a diferença na declividade do talvegue quando o rio passa por esta zona, entre os quilômetros 21 e 22, sendo este, portanto, um ponto de inflexão do relevo, da declividade do talvegue e da velocidade do rio principal por consequência, resultando na alteração do tempo de concentração entre os trechos de montante e de jusante deste ponto.

Figura 5 - Mapa de localização da zona de cisalhamento e do ponto de inflexão do relevo e da declividade do talvegue do rio principal



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Figura 6 - Perfil longitudinal do canal principal da microbacia do Rio Quixudi



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

O perfil longitudinal do canal principal da microbacia corresponde aos rios da AC1 e da AC3, sendo que o rio da AC2 integra a drenagem da microbacia como afluente do rio principal, confluindo com os rios da AC1 e da AC3 na altura do km 16,72 no gráfico da Figura 6. Portanto, o trecho em azul no referido gráfico — localizado entre a nascente e o km 16,72 — corresponde ao canal da AC1. Já o trecho em vermelho e preto que completa o gráfico corresponde aos 17,03 km do canal da AC3, totalizando os 33,75 km de extensão do canal principal. O canal da AC2, obviamente, não compõe o perfil longitudinal. O trecho destacado em vermelho entre os quilômetros 16,72 e 20,95



corresponde ao trecho do canal da AC3 que integra a parte alta da microbacia. Este trecho mede 4,23 km e se estende desde o ponto de confluência entre as três áreas de contribuição até o ponto de inflexão do relevo e da declividade. Os trechos com declividade zero identificados entre os quilômetros 7,6 e 8,7 do canal da AC1 e 26,4 e 29,0 da AC3 correspondem, respectivamente, ao açude Tapuio, no município de São Vicente do Seridó, e ao açude Santa Teresa, no município de Soledade.

No trecho correspondente a AC1, o gradiente do canal principal registrou 0,34%, ou seja, para cada 100 m de distância ao longo do canal, a elevação muda 34 cm. Com isso, a declividade equivalente do talvegue neste trecho foi de 5,19 m/km. Já no trecho correspondente a AC3 o gradiente registrou 0,29%, para uma declividade equivalente de 3,61 m/km. No canal principal como um todo o gradiente registrou 0,31%, e a declividade equivalente do talvegue resultou em 4,35 m/km.

A declividade do talvegue tem influência direta sobre o tempo de concentração (T_c) na microbacia, uma vez que interfere na velocidade de fluxo dos rios. Quanto maior for a declividade, maior será a velocidade do fluxo e menor será o T_c . O T_c é calculado, então, a partir da relação entre o comprimento do canal principal e a declividade equivalente de seu talvegue. Dessa forma, o T_c na AC1 — onde o canal é mais curto e a declividade é maior — registrou 4 horas e 24 minutos, enquanto que na AC3, o maior comprimento e a menor declividade do talvegue resultaram num T_c de 5 horas e 6 minutos. Na microbacia como um todo o T_c registrou 8 horas e seis minutos, significando um tempo longo, ou lento, condizente com inundações graduais. Esta é mais uma característica da microbacia que reforça a afirmativa de que sua susceptibilidade a inundação tem pouca influência dos fatores puramente físicos. Ou seja, em condições normais de precipitação, o comprimento e a declividade do talvegue do canal principal da microbacia propiciam uma velocidade de fluxo lenta da água dos rios, resultando num tempo de concentração longo, o que evita inundações bruscas.

No entanto, a partir da observação do mapa hipsométrico e do perfil longitudinal do canal principal da microbacia é possível constatar que, internamente, a velocidade do rio principal da microbacia é alterada a partir do ponto de inflexão destacado no mapa da Figura 5. Quando se considera a extensão do canal da AC1 até este ponto de inflexão, o acréscimo de 4,23 km no comprimento do referido canal resulta no aumento da diferença altimétrica entre seus extremos de 57 m para 64 m e da declividade equivalente do talvegue de 5,19 m/km para 5,40 m/km. Assim, o T_c também é alterado



entre os trechos do canal principal separados por este ponto de inflexão, uma vez que, na mesma medida em que o canal da AC1 tem seu comprimento aumentado, no canal da AC3 o comprimento é reduzido. Com isso, no trecho de montante do ponto de inflexão o Tc passa a registrar 5 horas de 12 minutos, enquanto que no trecho de jusante o Tc muda para 4 horas e 18 minutos.

Outro parâmetro que também é alterado entre os trechos de montante e de jusante do ponto de inflexão é a sinuosidade. Como visto na análise linear, a sinuosidade na AC1 e na AC3 corresponde ao mesmo índice registrado no canal principal como um todo, ou seja, $1,20 \text{ km}\cdot\text{km}^{-1}$. No entanto, considerado a partir do ponto de inflexão, o trecho de jusante registrou um índice de sinuosidade menor, qual seja, $1,18 \text{ km}\cdot\text{km}^{-1}$. O trecho de montante, por sua vez, manteve o mesmo índice de $1,20 \text{ km}\cdot\text{km}^{-1}$.

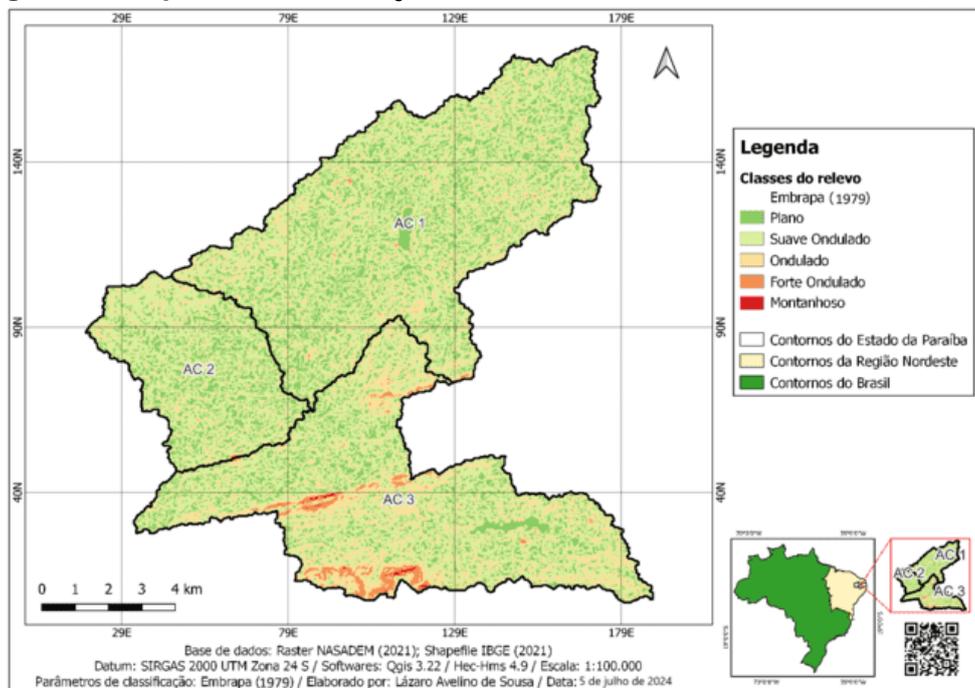
Em resumo, considerando o ponto de inflexão como referência, têm-se um trecho de rio mais longo, mais sinuoso e mais declivoso na área de montante, ao passo que, na área de jusante, tem-se um trecho de rio mais curto, mais retilíneo e menos declivoso, sendo este trecho mais propenso a inundação do que o trecho de montante. Neste caso em particular, percebe-se que a morfologia da microbacia afeta sua condição de susceptibilidade a inundação, na medida em que tal inflexão no relevo propicia que toda a água da parte alta da microbacia — que tem uma área de captação bem maior — seja despejada no curto trecho de jusante, que também é menos sinuoso e, por isso, tem menor tempo de concentração. O fato de o trecho de jusante ser menos declivoso também contribui com a formação de inundações, pois propicia que toda a água provinda de montante — após descer bruscamente os 21 m no ponto de inflexão — tenha sua velocidade de fluxo refreada, ocasionando rápida acumulação. Conclui-se, então, que em caso de evento extremo de precipitação, esta configuração física da microbacia potencializa a ocorrência de inundação em sua área de jusante.

Quanto à classificação do relevo da microbacia, o mapa da Figura 7 confirma um relevo predominantemente plano a suave ondulado, com pequenas parcelas com declividades mais acentuadas próximo da zona de cisalhamento e no extremo sul da AC3, chegando ao máximo de 67,97% de inclinação zenital em relação ao plano.

A declividade média na microbacia registrou 5,78%. Valores como este, menores que 6%, representam uma declividade muito fraca de acordo com Ross (2011). Isso implica que a susceptibilidade a erosão nos solos da microbacia, a depender do fator declividade, também é muito fraca. Sabino *et al.* (2020) encontraram valores médios de

declividade bem menores, variando entre 1,8% e 4,2%, em bacias hidrográficas localizadas nos Estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo e Goiás. Valores baixos como esses colaboram com a lentidão do escoamento superficial e, como consequência, propiciam maior infiltração da água no solo, inibindo a formação de enchentes nos rios. Diante disso, observando-se o caso particular da microbacia do rio Quixudi, percebe-se que o relevo plano a suave ondulado dificulta a formação de inundações em condições normais de precipitação. No entanto, em caso de evento extremo de precipitação, o aumento repentino no volume de chuvas pode provocar a saturação hídrica do solo, resultando em alagamento de áreas planas.

Figura 7 - Mapa de classificação do relevo da Microbacia do Rio Quixudi



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A razão de relevo, por sua vez, representa a relação entre a amplitude altimétrica máxima e o comprimento do eixo axial da bacia. Quanto maior for o valor da razão de relevo, maior será o desnível entre a cabeceira e o exutório, consequentemente maior será a declividade média da bacia. No caso em tela, a razão de relevo foi de apenas 0,01 km, ou 10 m. Esse baixo valor condiz com as características do relevo plano a suave ondulado já verificadas na bacia, ou seja, com essa razão de relevo a declividade média é muito fraca na bacia.

Quanto ao índice de rugosidade, o valor é obtido da relação entre a amplitude altimétrica da bacia e a densidade de drenagem. Este índice mostra a relação da



declividade com os comprimentos dos canais, sendo que “quanto maior for o índice implica em relevo mais colinoso e dissecado e canais mais entalhados” (Castro e Carvalho, 2009, p. 6). A rugosidade na microbacia do rio Quixudi é considerada fraca, tendo registrado um índice de 137 (adimensional), condizendo com um relevo pouco dissecado.

Em resumo, a análise altimétrica revelou uma bacia com relevo majoritariamente plano a suave ondulado, com amplitude altimétrica concentrada na área de jusante, onde se observa também as maiores declividades. Essa configuração física da bacia — que apresenta um relevo pouco dissecado, com declividade média muito fraca — propicia uma drenagem de fluxo lento, contribuindo com a conservação da bacia. A inflexão no padrão de relevo a partir da zona de cisalhamento é uma peculiaridade da microbacia que potencializa sua susceptibilidade a inundações em caso de evento extremo de precipitação, dada a alteração na dinâmica interna da drenagem a partir dessa inflexão.

Conclusões

A microbacia do rio Quixudi é caracterizada em seus aspectos hidromorfológicos gerais como uma área de drenagem do tipo endorréica, com 141,5 km², composta por uma rede hidrográfica efêmera, de padrão dendrítico com extensão total de 105,20 km.

A análise linear da rede hidrográfica mostrou uma bacia de 4^a ordem, com sinuosidade transicional, baixa razão de bifurcação e extensão do percurso superficial relativamente longa. Essa morfologia da drenagem indica que, em condições normais de precipitação, a microbacia é pouco susceptível a inundações, ficando esta susceptibilidade a cargo de anormalidades no campo meteorológico.

A análise areal mostrou uma bacia de formato comprido, com textura grosseira e baixas densidades de drenagem e hidrográfica, resultando num coeficiente de manutenção de 1.344,7 m²·m⁻¹. O formato comprido da bacia, teoricamente, afasta a possibilidade de ocorrência de inundações, porém, em caso de evento extremo de precipitação, a susceptibilidade da microbacia a esses eventos é potencializada pelas baixas densidades de drenagem e hidrográfica.

A análise altimétrica revelou uma amplitude máxima de 184,0 m, concentrada na área de jusante da microbacia, causando uma notável diferença no relevo dessa área em



relação ao restante da bacia. Essa diferença é marcada por uma zona de cisalhamento que atravessa a bacia longitudinalmente, separando a parte mais alta da bacia (ao sul) da parte mais baixa (ao norte). Esta inflexão no relevo interfere na dinâmica interna da drenagem, alterando a declividade e a sinuosidade do canal principal e potencializando a susceptibilidade à inundação em caso de evento extremo de precipitação.

O relevo na microbacia é classificado como predominantemente plano a suave ondulado, com declividade média de 5,78%, sendo considerada muito fraca. Com isso, a razão de relevo é de apenas 10 m e o índice de rugosidade de 137 (adimensional) condiz com um relevo pouco dissecado. Isto implica que a susceptibilidade a erosão nos solos da microbacia, a depender do fator declividade, também é muito fraca.

Conclui-se que o fator climático é a característica que tem maior implicância na definição da susceptibilidade da microbacia a inundação, já que se trata de uma bacia de drenagem efêmera, com clima semiárido de estepe, sendo possível afirmar que a ocorrência de eventos extremos de precipitação tem maior influência sobre as inundações na microbacia do que as características morfométricas analisadas.

Referências

Amorim, A. T.; Piroli, E. L. Análise ambiental da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Bonito: uma abordagem morfométrica e do uso e cobertura das terras. **Entre-Lugar**, v. 11, n. 22, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.30612/el.v11i22.11318>. Acesso em: 20 jun. 2024.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Atlas de Vulnerabilidade a Inundações**. 2014. ISBN: 978-85-8210-025-7. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/2cfa808b-b370-43ef-8107-5c3bfd7acf9c/attachments/Atlas_de_Vulnerabilidade_a_Inundaes.pdf. Acesso em: 4 jul. 2024.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **GeoPackage (Bacias Hidrográficas Ottocodificadas [Níveis Otto 1-7])**. Catálogo de metadados da ANA. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 (BHO 2017). 2012. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b228d007-6d68-46e5-b30d-a1e191b2b21f>. Acesso em: 25 jun. 2024.

Azambuja, A.; Conceição, A.; Pereira, V. R. Caracterização fisiográfica da Bacia do Ribeirão Xambioazinho, Xambioá-TO. **Repositório Institucional de Geociências**, v. 2, 2021. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22759.5>. Acesso em: 11 ago. 2024.



- Borsato, F. H. **Caracterização física das bacias de drenagem do município de Maringá e os postos de combustíveis como potenciais poluidores**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/2010/artigos_teses/teses_geografia2008/dissertacaouemfabianohugoborsato.pdf. Acesso em: 6 jul. 2024.
- Campanharo, W. A. **Diagnóstico físico da bacia do rio Santa Maria do Doce-ES**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2010. Disponível em: https://florestaemadeira.ufes.br/sites/florestaemadeira.ufes.br/files/TCC_Wesley%20Augusto%20Campanharo.pdf. Acesso em: 8 ago. 2024.
- Castro, S. B.; Carvalho, T. M. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo-GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Scientia Plena**, v. 5, 2009. Disponível em: <https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/623>. Acesso em: 5 jul. 2024.
- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). **Anuário da sala de situação do CEMADEN**. v. 3, n. 1, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/aceso-a-informacao/anuario-da-sala-de-situacao/anuario-da-sala-de-situacao-do-cemaden-ano-2019-vol-3-2022.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.
- Christofoletti, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.
- Christofoletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.
- Dornellas, C. P. et al. Análise Morfométrica Da Bacia Do Alto Rio Paraíba, Região Semiárida Do Estado Da Paraíba. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1757>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- Dummer, J.; Verдум, R. Controle estrutural nos processos erosivos hídricos e na arenização, bacia hidrográfica do Arroio Miracatu - Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 24, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2318>. Acesso em: 4 jul. 2024.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Súmula da 10. reunião técnica de levantamento de solos**. 1979. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212100/1/SNLCS-Miscelania-1-1979.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2024.
- Falcão, C. L. C. A teoria geral dos sistemas e o entendimento dos processos erosivos em uma bacia hidrografia. **Revista Equador**, v. 9, n. 4, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.26694/equador.v9i4.10621>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- Ferreira, V. Rios temporários. **Revista de Ciência Elementar**, v. 11, 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.24927/rce2023.023>. Acesso em: 9 ago. 2024.



França, G. V. D. **Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba**. 1968. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.1900.tde-20231122-093027>. Acesso em: 11 ago. 2024.

Guerra, A. T.; Guerra, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

Horton, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, 1945. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2). Acesso em: 18 jul. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de Clima do Brasil**. 2002. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Mapa_BR_clima_2002.pdf. Acesso em: 9 set. 2024.

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>. Acesso em: 11 jun. 2024.

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Regional fact sheet – Central and South America**. 2021b. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Central_South_America.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélite (Lapis). **Baixe o Shapefile do novo Semiárido brasileiro e elabore mapas incríveis com a nova delimitação da região**. 2024. Disponível em: <https://mapadamina.org.br/shapefile>. Acesso em: 17 ago. 2024.

Lopes, J. R. A. et al. Caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica do Açude Grande no semiárido do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p429-442>. Acesso em: 11 jul. 2024.

Mostarda Neto, N. **Uso de diferentes métodos de obtenção do tempo de concentração e suas implicações no cálculo de vazão na bacia do Ribeirão Itaim, Taubaté-SP**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/6981>. Acesso em: 17 jul. 2024.

Moura, B. T. et al. Análise Morfométrica Da Bacia Do Rio Taperoá, Semiárido Do Nordeste Brasileiro Utilizando O Modelo Swat. **XXV Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos**, 2023. Disponível



em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/191/XXV-SBRH0860-1-0-20230618-215940.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2024.

Moura, M. O. et al. Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço-temporal dos reconhecimentos de Estado de Calamidade Pública. **Caderno de Geografia**, v. 26, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p259>. Acesso em: 6 jul. 2024.

National Aeronautics and Space Administration/ Jet Propulsion Laboratory (NASA/JPL). **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001**. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G93T9FD9>. Acesso em: 27 jun. 2024.

Paiva, R. et al. **Crerios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/iph/wp-content/uploads/2024/05/CriteriosAdaptacaoMudancaClimaticaChuvasCheiasExtremasSul.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2024.

Rodrigues, V. A. et al. Análise morfométrica da microbacia do Ribeirão das Araras-SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 21, 2013. Disponível em: <https://faef.revista.inf.br/site/e/engenharia-florestal-21-edicao-12013.html#tab360>. Acesso em: 5 jul. 2024.

Ross, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 8, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>. Acesso em: 11 ago. 2024.

Sabino, H. et al. Morfometria de bacias hidrográficas de primeira ordem em áreas agrícolas sob sistema plantio direto: delimitação e propensão à erosão e inundação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1770>. Acesso em: 10 jun. 2024.

Sampaio, A. S. et al. Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias rurais. **XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2016. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=544>. Acesso em: 5 jul. 2024.

Schumm, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, 1956. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2). Acesso em: 8 ago. 2024.

Schumm, S. A. Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. **Geological Society of America Bulletin**, v. 74, 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[1089:SOAROT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[1089:SOAROT]2.0.CO;2). Acesso em: 9 ago. 2024.

Silva, G. C. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho Rangel-Piauí, Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, 2018. Disponível em: http://doi.org/10.18677/EnciBio_2018B22. Acesso em: 3 jul. 2024.

Sousa, L. A.; Silva, J. B.; Araújo, S. M. S. Uso e ocupação da superfície a partir do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) na Área de Proteção Permanente (APP) do açude



Santa Teresa em Soledade-PB. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36489>. Acesso em: 3 jun. 2024.

Souza, Ê. G. F. et al. Delimitação e caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho do Navio, Pernambuco, a partir de dados SRTM processados no QGIS. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 14, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1530-1540>. Acesso em: 21 ago. 2024.

Souza, L. D. S. et al. Modelagem Espacial de Chuvas Intensas no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863730059>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Strahler, A. N. Dynamic basis of geomorphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, 1952. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2). Acesso em: 1 jul. 2024.

Strahler, A. **Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks**. In: CHOW, V. (Ed.). **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw Hill, 1964. p. 439-476.

Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). **Delimitação do Semiárido**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2024.

Targa, M. D. S. et al. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.905>. Acesso em: 11 jul. 2024.

Universidade de São Paulo (USP). **Base Cartográfica Digital Georreferenciada das Zonas Climáticas, conforme Köppen, do Brasil**. 2021. Distribuída pelo Centro de Estudos da Metrópole da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://doi.org/10.55881/CEM.db.clk001>. Acesso em: 5 jun. 2024.