

Caracterização morfo-hidrológica de pequena bacia amazônica como subsídio ao processo de revitalização de rio urbano

Morpho-hydrological characterization of a small Amazon basin as a support for the urban river revitalization process

Caracterización morfohidrológica de una pequeña cuenca amazónica como apoyo al proceso de revitalización fluvial urbana

John Witysel Santos Rodrigues

Bacharelado em Engenharia Civil, UFOPA, Brasil.
johnwitysel@outlook.com

Marcos Antonio Barbosa da Silva Junior

Professor Mestre, UFOPA, Brasil.
marcos.abs@ufopa.edu.br

RESUMO

No cenário urbano, os rios estão vulneráveis à diversas ações antrópicas que impactam a sua funcionabilidade, como: ocupações marginais irregulares, lançamento de efluentes, descarte de resíduos e obras hidráulicas inadequadas. É neste contexto que se encontra o Igarapé Oriundo, um pequeno rio urbano do município de Itaituba, sudoeste do Pará. Como um passo inicial para o seu eventual processo de revitalização, este artigo realizou uma caracterização morfo-hidrológica de sua bacia de drenagem em ambiente SIG. Para isso, foram utilizadas imagens SRTM, como fonte de dados altimétricos, e o software QGIS, para o processamento e análise dos dados. Definidos os limites da área de contribuição da bacia, foram obtidas e avaliadas as suas características: físicas, morfométricas e hidrológicas. Quanto às características físicas, a área de drenagem obtida foi de 2,73 km², perímetro de 10,41 km, altitude média de 21,15 m, declividade média de 3,97% e comprimento axial da bacia de 3,82 km. Foi identificado o Igarapé Oriundo como único canal contribuinte, com extensão de cerca de 4,05 km. Em relação a morfometria, a bacia apresentou coeficiente de compacidade de 2,76, fator de forma de 0,19 e razão de alongação de 0,49; assim como densidade de drenagem de 1,49 km/km², razão de relevo de 0,01 e índice de sinuosidade de 1,06. As vazões máximas obtidas, considerando uma chuva com TR de 10 anos e 25 anos, foram de 29,64 e 34,90 m³/s. Nesse viés, conclui-se que a bacia possui baixa susceptibilidade a enchentes em condições normais de precipitação.

PALAVRAS-CHAVE: Bacia hidrográfica. Morfometria. QGIS.

SUMMARY

In the urban scenario, rivers are vulnerable to various human actions that impact their functionality, such as: irregular marginal occupations, discharge of effluents, waste disposal and inadequate hydraulic works. It is in this context that the Igarapé Oriundo, a small urban river in the municipality of Itaituba, southwest of Pará, is found. As an initial step towards its eventual revitalization process, this article carried out a morpho-hydrological characterization of its drainage basin in an environment SIG. For this, SRTM images were used as a source of altimetric data, and the QGIS software was used for data processing and analysis. Once the limits of the basin's contribution area were defined, its characteristics were obtained and evaluated: physical, morphometric and hydrological. As for the physical characteristics, the drainage area obtained was 2.73 km², perimeter of 10.41 km, average altitude of 21.15 m, average slope of 3.97% and axial length of the basin of 3.82 km. Igarapé Oriundo was identified as the only contributing channel, with a length of around 4.05 km. Regarding morphometry, the basin had a compactness coefficient of 2.76, a shape factor of 0.19 and an elongation ratio of 0.49; as well as drainage density of 1.49 km/km², relief ratio of 0.01 and sinuosity index of 1.06. The maximum flows obtained, considering rainfall with TR of 10 years and 25 years, were 29.64 and 34.90 m³/s. In this sense, it is concluded that the basin has low susceptibility to flooding under normal precipitation conditions.

KEYWORDS: Watershed. Morphometry. QGIS.

RESUMEN

En el escenario urbano, los ríos son vulnerables a diversas acciones humanas que impactan su funcionalidad, tales como: ocupaciones marginales irregulares, descargas de efluentes, disposición de residuos y obras hidráulicas inadecuadas. Es en este contexto que se encuentra el Igarapé Oriundo, un pequeño río urbano del municipio de Itaituba, al suroeste de Pará. Como paso inicial hacia su eventual proceso de revitalización, este artículo realizó una caracterización morfohidrológica de su cuenca de drenaje, en un entorno SIG. Para ello se utilizaron imágenes SRTM como fuente de datos altimétricos y para el procesamiento y análisis de datos se utilizó el software QGIS. Una vez definidos los límites del área de aporte de la cuenca, se obtuvieron y evaluaron sus características: físicas, morfométricas e hidrológicas. En cuanto a las características físicas, el área de drenaje obtenida fue de 2,73 km², perímetro de 10,41 km, altitud promedio de 21,15 m, pendiente promedio de 3,97% y longitud axial de la cuenca de 3,82 km. Igarapé Oriundo fue identificado como el único canal contribuyente, con una longitud de alrededor de 4,05 km. En cuanto a la morfometría, la cuenca tuvo un coeficiente de compacidad de 2,76, un factor de forma de 0,19 y un índice de elongación de 0,49; así como una densidad de drenaje de 1,49 km/km², relación de relieve de 0,01 e índice de sinuosidad de 1,06. Los caudales máximos obtenidos, considerando precipitaciones con TR de 10 años y 25 años, fueron 29,64 y 34,90 m³/s. En este sentido, se concluye que la cuenca tiene baja susceptibilidad a inundaciones en condiciones normales de precipitación.

PALABRAS CLAVE: Cuenca. Morfometría. QGIS.

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Federal N° 9433/97, e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH (BRASIL, 1997). A Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2011) define bacia hidrográfica (BH) como uma região pertencente a um dado território e delimitada por divisores de água. Toda precipitação no interior dessa área, e que não infiltra, escoar até um curso d'água e essa água, por sua vez, geralmente converge e é descarregada através de um único exutório localizada no ponto mais baixo da região.

Através de cartas topográficas ou imagens de satélite, é possível estabelecer os limites da área de uma bacia, partindo de um ponto pré-definido como exutório e contornando a região seguindo as cristas de maior elevação no terreno. Para isso, atualmente, essa abordagem requer o uso de técnicas de geoprocessamento a fim de obter, processar e exibir a informação espacial de forma atempada e econômica.

A aplicação do software QGIS para o processamento de um Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido a partir de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e sua aplicação efetiva no processo de caracterização de bacias hidrográficas é atestada e recomendada por diversos pesquisadores no mundo, pois além de garantir maior precisão, também proporcionam economia de tempo, menor exatidão e, logo, maior praticidade (SCHMITT; MOREIRA, 2015; SILVA JUNIOR et al., 2019; SOUZA et al., 2021). O uso do SIG permite, também, atualizar ou recuperar informações georreferenciadas, derivar modelos cartográficos diversos e gerar mapas interativos.

Parâmetros físicos, morfométricos e climáticos influenciam, diretamente, na dinâmica hidrológica de uma bacia e, por isso, é necessário conhecer suas características (SILVA JUNIOR et al., 2019). Em uma bacia urbana, Rocha (2022) ressalta que o ponto de partida para a escolha e definição dos dispositivos de drenagem em um projeto de infraestrutura corresponde à vazão máxima de contribuição. Consoante a isso, o dimensionamento de dispositivos e unidades de um sistema de drenagem deve levar em conta o aporte de água pluvial que deve escoar e, logo, a área de contribuição da bacia de drenagem e suas características morfo-hidrológicas.

Assim como a maioria das cidades amazônicas, Itaituba, situada no sudoeste do Pará, “nasceu” dos rios. O município está inserido na bacia hidrográfica do Rio Tapajós, que é um dos principais afluentes do Rio Amazonas. Na região do Tapajós, segundo Schuber e Moraes (2015), a urbanização foi intensificada na conhecida “década áurea da garimpagem” nos anos de 1980 e, desde então, se observou um processo de expansão explosivo sem o acompanhamento da infraestrutura básica. Nesse cenário, nos deparamos com a ocupação massiva das áreas mais próximas do rio Tapajós (inclusive nas zonas alagadiças, em palafitas, como a conhecida “Vila Caçula”, no bairro de São José) e a expansão para o interior do território, de jusante a montante. Deste modo, o Igarapé Oriundo como um pequeno rio afluente do Tapajós, que corta a cidade, é marcado pela ocupação ribeirinha irregular e desordenada, sofrendo ações antrópicas e tendo que se moldar ao progresso.

Entendemos, assim, que a ocupação irregular dessas áreas não representa apenas um risco ambiental, mas também social. Segundo Vieira et al. (2023), entre o período de 2002 e

2020, 26.248 pessoas estavam expostas ao risco de inundação em Itaituba. Nesse tocante, uma pesquisa a cerca de drenagem urbana sustentável é entendida como um meio para revitalizar essas áreas críticas nos centros urbanos, a fim de reduzir a deterioração e re-marginalização dessa população, prezando a qualidade de vida e um funcionamento ótimo das cidades. Portanto, partimos da delimitação e caracterização morfo-hidrológica da bacia de drenagem do Igarapé Oriundo, uma vez que são informações inexistentes no município e na literatura, como o primeiro passo em um estudo futuro para reabilitar todo o sistema fragilizado.

2 OBJETIVO

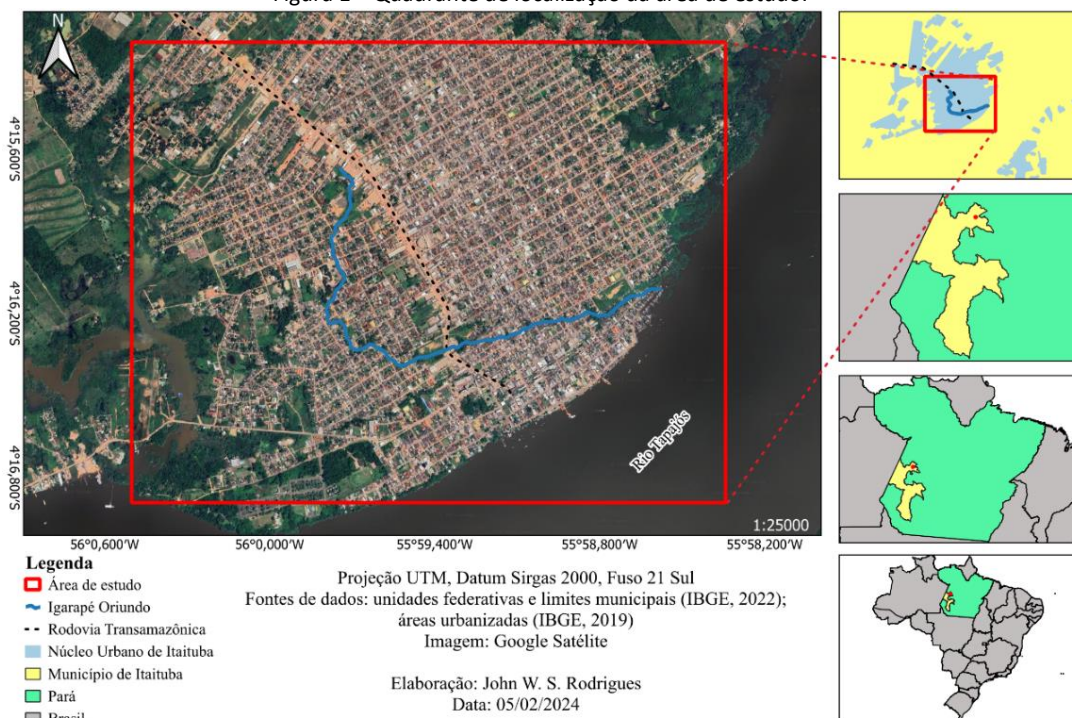
Realizar a caracterização morfo-hidrológica da bacia de drenagem do Igarapé Oriundo, utilizando técnicas de geoprocessamento, de modo a fornecer subsídios para eventual processo de revitalização do seu curso d'água e sistema integrante.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

Considerando o Igarapé Oriundo como um curso de água urbano, este estudo partiu da análise da região ocupada da cidade ao qual o corpo d'água está inserido, gerando uma área de estudo com área de cerca de 12,38 km² e coordenada média de latitude 4° 16' 4.210" S e longitude 55° 59' 24.831" O, conforme se observa na Figura 1.

Figura 1 – Quadrante de localização da área de estudo.



Fonte: Autores.

O Igarapé Oriundo é um afluente do Rio Tapajós e está totalmente inserido no núcleo urbano da cidade de Itaituba, localizada na região sudoeste do Pará. O município possui uma população de 123.314 habitantes e uma extensão territorial de 62.042,472 Km² (IBGE, 2023). Em 2019, o seu núcleo urbano possuía uma área de 33,42 km², com 2,3% de urbanização das vias públicas em 2010 (IBGE, 2023). O clima da região apresenta temperatura mínima superior a 18°C e a umidade relativa superior aos 80% em quase todos os meses do ano. Outro fator relevante é que as estações chuvosas de maiores intensidades ocorrem entre dezembro e junho, com índices pluviométricos próximos dos 2065 mm/ano. E, de acordo com o balanço hídrico climatológico, o excedente de água no solo aumenta nos meses de fevereiro a abril, que somando chega a 884 mm (SILVA JUNIOR et al., 2023).

Conforme relata Silva Junior et al. (2023), o atual cenário urbanístico de Itaituba, desenhado por um processo de ocupação sem planejamento, vem promovendo uma série de impactos na infraestrutura da cidade, como: ocupação irregular nas margens dos cursos d'água; aumento do escoamento superficial; processos de assoreamento; eutrofização; interações negativas dos sistemas de drenagem urbana com os efluentes domésticos; disposição irregular dos resíduos sólidos urbanos; dentre outros. Tais fatores, favorecem à fragilidade do sistema de drenagem urbana, afetando diretamente o seu desempenho durante os eventos de chuva.

O Igarapé Oriundo apresenta uma extensão aproximada de 4 km, com nascente na R. Décima/1ª Tv. do Bairro da Floresta e desaguando no Rio Tapajós, atravessando os bairros da Floresta, Liberdade, Nossa Senhora do Perpétuo Socorro e São José. Sua seção hidráulica é sem revestimentos e irregular, com trechos retificados e seção estreitada (com largura variando de 2,4 a 8,5m) devido a ocupação ribeirinha, depósito de resíduos e assoreamento (Figura 2).

Figura 2 – Trechos estreitados do Igarapé devido ao assoreamento e ocupação irregular no Bairro da Liberdade.



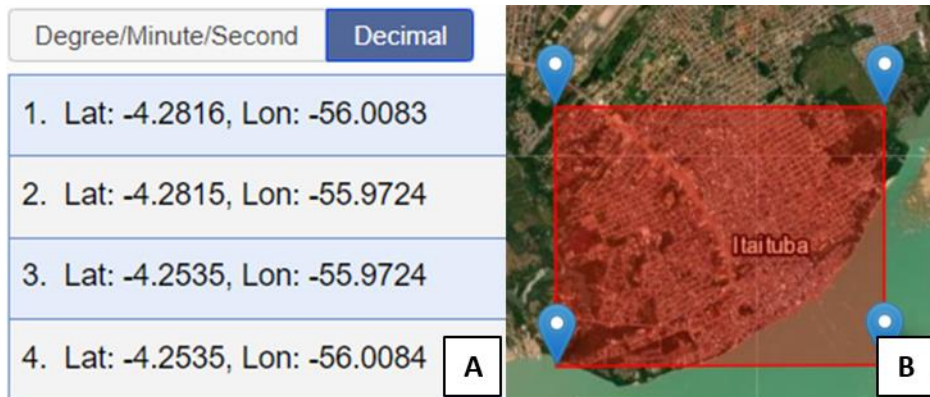
Fonte: Autores.

3.2 Obtenção e tratamento das imagens SRTM

Com a área de estudo estabelecida, foram inseridas as coordenadas decimais (Figura 3a) na plataforma *Earth Explorer* USGS (NASA) e definida a área de interesse (Figura 3b), a fim de obter as imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), de resolução (tamanho de pixel) de 30 m, com os dados altimétricos necessários. Como resultado, foram geradas duas cenas e, portanto, houve a necessidade de junção das mesmas no software QGIS, através da ferramenta “Mosaico”. Considerando que as imagens STRM são representações de uma superfície tridimensional em um plano, se fez necessário o tratamento das imagens para evitar distorções.

Desse modo, foi realizada a reprojeção da camada *raster* de graus (SRC de origem) para métrico (Sirgas 2000/UTM Zone 21S). Realizada a reprojeção, prosseguiu-se com recorte da área de estudo de acordo com as dimensões e coordenadas já dispostas anteriormente, no item 3.1.

Figura 3 – Obtenção de dados altimétricos: (a) Representação das coordenadas inseridas para obtenção de imagem SRTM e (b) visualização da área definida.



Fonte: Autores.

3.3 Delimitação da bacia de drenagem

Ainda no QGIS, com o Modelo Digital de Elevação (MDE) reprojeto e recortado para a área de interesse, seguiu-se com a definição dos limites da bacia de drenagem. Na Figura 4 é possível visualizar os processos realizados.

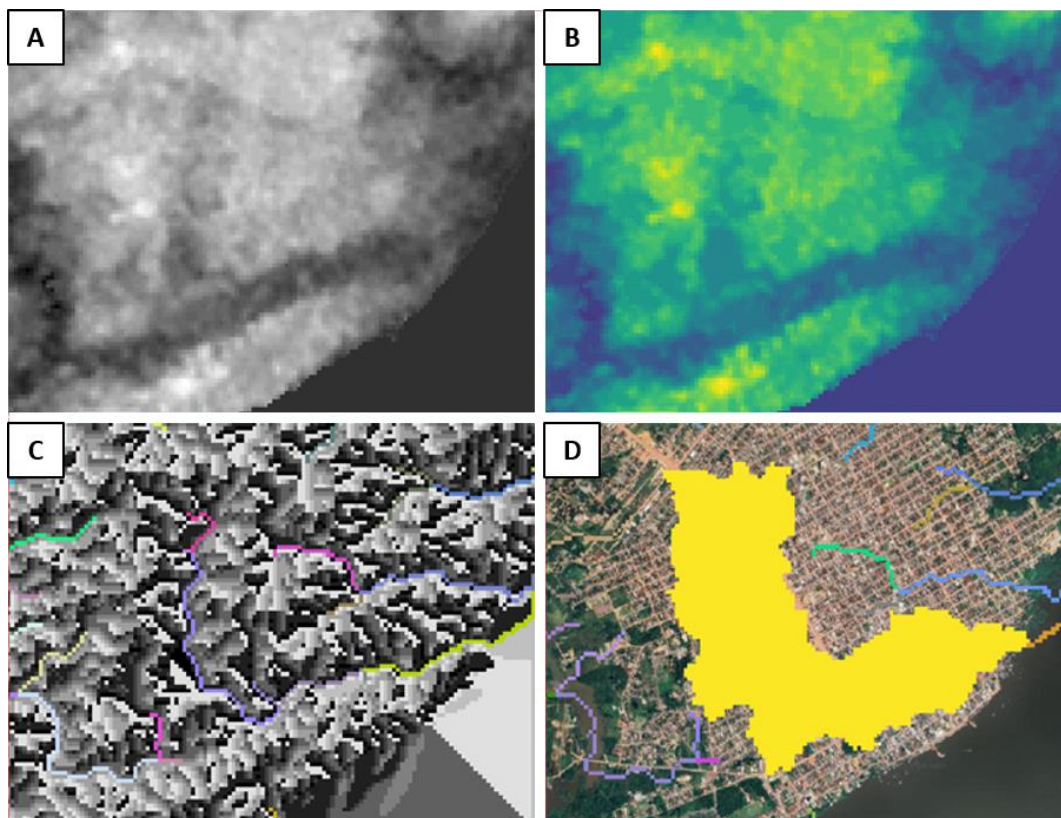


Figura 4 – Processo de delimitação da bacia: (a) Resultante do recorte do MDE com a camada de área de estudo como máscara; (b) Camada com preenchimento das depressões; (c) Representação da direção de fluxo e segmentos de fluxo identificados na região; (d) Visualização da área de contribuição da bacia definida através do exutório.

Fonte: Autores.

Como um MDE bruto e não processado tem artefatos, como depressões, essas precisam ser removidas (preenchidas) para uma análise hidrológica (Figura 4a). Para isso, foi instalado e habilitado o plugin “Grass”, onde utilizou-se o programa *fill (r.fill.dir)* no MDE com o objetivo de gerar uma camada com o preenchimento dessas depressões (*Depressionless DEM*) (Figura 4b). O próximo passo para a delimitação da bacia foi identificar a direção dos fluxos e os segmentos de fluxo, com a ferramenta *r.watershed*. Utilizando a camada com as depressões preenchidas, definiu-se o tamanho mínimo das bacias exteriores num valor de 100 e foram geradas, assim, camadas para direção de drenagem (*drainage direction*) e segmento de fluxo (*stream segment*) (Figura 4c). Com a representação dos corpos d’água situados na área, definindo a camada de direção de drenagem como base e tendo conhecimento que exutório requerido é o ponto onde o Igarapé Oriundo deságua no Rio Tapajós, utilizou-se o programa *r.water.outlet* para a “criação” da bacia hidrográfica a partir desse ponto (Figura 4d).

3.4 Caracterização física

Para determinar as características morfométricas e hidrológicas de uma dada bacia, primeiro se faz necessário conhecer os seus valores físicos (geométricos e de relevo). Nesse estudo, foram obtidos os seguintes parâmetros: a área da bacia; perímetro; comprimento e quantidade de canais; e valores altimétricos. Para tanto, foram utilizadas as ferramentas de “Estatísticas Zonais” e a “Calculadora de Campo” do QGIS, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1 – Disposição dos índices físicos e de relevo obtidos.

Índice	Ferramenta	Função	Descrição
Área	Calculadora de campo	= \$area / 1000000	Área de drenagem da bacia, em km ² .
Perímetro	Calculadora de campo	= \$perimeter / 1000	Perímetro da bacia, em km.
Comprimento	Calculadora de campo	= \$length / 1000	Comprimento do canal principal, em km.
Comprimento Axial	Calculadora de campo	= \$length / 1000	Refere-se ao comprimento axial da bacia, ou seja, o comprimento do canal principal sem as sinuosidades, em km.
Altitude média e Diferença Altimétrica (ΔH)	Estatísticas Zonais	<ul style="list-style-type: none"> • Camada vetorial: delimitação da bacia. • Camada raster: MDE (<i>depressionless DEM</i>). • Estatística: “alt mean” e “alt range”. 	A diferença altimétrica está entre a cota de maior altitude pela de menor altitude, em m, dentro da bacia.
Declividade Média	Grass	<ul style="list-style-type: none"> • Grass → Raster → <i>r.slope.aspect</i> • Estatísticas zonais → média 	Do plugin GRASS, utilizou-se o MDE da bacia na ferramenta <i>r.slope.aspect</i> para gerar uma camada raster com a declividade em porcentagem. A partir disso, pôde-se usufruir do recurso “Estatísticas Zonais” para obter a declividade média.

Fonte: Autores.

3.5 Caracterização morfométrica

Os índices morfométricos obtidos foram: coeficiente de compacidade, fator de forma, razão de alongação, densidade de drenagem, razão de relevo e índice de sinuosidade do rio principal; dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos índices morfométricos adotados.

Índices/Referência	Fórmulas*	Descrição	Classificação
Coeficiente de Compacidade - K_c (Lima, 1969)	$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Relaciona a forma da bacia com a de um círculo de área equivalente.	<ul style="list-style-type: none"> Ala propensão a grandes enchentes: $1 < K_c \leq 1,25$ km/km²; Tendência mediana a grandes enchentes: $1,25 < K_c \leq 1,50$ km/km²; Não sujeita a grandes enchentes: $K_c > 1,50$ km/km².
Fator de Forma - K_f (Horton, 1945)	$K_f = \frac{A}{L'^2}$	Relação entre a área da bacia e o quadrado do comprimento do seu eixo axial.	<ul style="list-style-type: none"> Sujeita a enchentes: $1 < K_f \leq 0,75$ km/km; Tendência mediana a enchentes: $0,75 < K_f \leq 0,50$ km/km; Não sujeita a enchentes: $K_f < 0,50$ km/km.
Razão de Alongação - R_e (Schumm, 1956)	$R_e = 1,128 \frac{\sqrt{A}}{L'}$	Relação entre o diâmetro do círculo de área igual à área da bacia e o comprimento do eixo da bacia.	<ul style="list-style-type: none"> Quanto maior o valor da R_e, mais próximo estará de um círculo, então considera-se a bacia maior e com probabilidade de enchentes.
Densidade de Drenagem - D_d (Horton, 1945)	$D_d = \frac{L_{tot}}{A}$	Relação entre o comprimento total dos cursos d'água e a área de drenagem.	<ul style="list-style-type: none"> Drenagem pobre: $D_d < 0,5$ km/km²; Drenagem regular: $0,5 \leq D_d < 1,5$ km/km²; Drenagem boa: $1,5 \leq D_d < 2,5$ km/km²; Drenagem muito boa: $2,5 \leq D_d < 3,5$ km/km²; Excepcionalmente bem drenada: $D_d \geq 3,5$ km/km².
Razão de Relevo - R_R (Christofolletti, 1969)	$R_R = \frac{\Delta H}{L'}$	Relação entre a amplitude altimétrica e o comprimento axial do rio principal.	<ul style="list-style-type: none"> Baixa: $0,00$ km/km $\leq R_R \leq 0,10$ km/km; Média: $0,11$ km/km $\leq R_R \leq 0,30$ km/km; Alta: $0,31 \leq R_R \leq 0,60$ km/km.
Índice de Sinuosidade - I_s (Schumm, 1963)	$I_s = \frac{L}{L'}$	Indica os meandros do rio principal.	<ul style="list-style-type: none"> Canais retilíneos: $I_s \cong 1,0$ km/km; Canais tortuosos: $I_s > 2,0$ km/km.

Fonte: Autores.

*Nota: A – área de drenagem da bacia (km²); L' – comprimento do eixo axial (km); P – perímetro da bacia (km); Ltot – comprimento total de todos os canais da rede de drenagem (km); ΔH – diferença altimétrica (km).

3.6 Caracterização hidrológica

Este item focou na obtenção das vazões máximas de descarga da bacia utilizando o método racional e, para tanto, na estipulação do coeficiente de escoamento superficial "C" com base na impermeabilização do solo; no cálculo do tempo de concentração da bacia com o uso da equação de Kirpich; e, por fim, no montante de intensidade de chuva a partir das relações intensidade-duração-frequência (IDF).

3.6.1 Método Racional

Este método, segundo Smedema e Rycroft (1983), é muito utilizado para obtenção das descargas máximas em redes de drenagem de pequenas bacias urbanas, com grande proporção de área impermeabilizada, sendo expresso pela Equação 1 a seguir.

$$Q_{m\acute{a}x} = 0,2778 \times C \times i \times A \tag{Equação 1}$$

Em que: $Q_{m\acute{a}x}$ = Vazão máxima do escoamento superficial (m³/s); C = Coeficiente de escoamento superficial (*run-off*); i = Intensidade máxima de precipitação com duração igual ao tempo de concentração (mm/h); e A = Área da bacia de drenagem (km²).

Com a obtenção das vazões máximas, considerando tempos de retorno (TR) para obras de macrodrenagem, adicionalmente foi dimensionada uma seção típica para o Igarapé, que pode ser adotada em eventual processo de revitalização. Para isso, considerou-se a geometria trapezoidal, com inclinação dos taludes de 1:1 (V:H), apresentando um leito pedregulhoso e vegetação nas margens. Para este dimensionamento, concebido em planilhas eletrônicas, foi utilizada a equação de Chézy-Manning combinada com a equação da continuidade (Equação 2), que são amplamente adotadas para cálculos em condutos livres.

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_H^{2/3} \times I^{1/2} \tag{Equação 2}$$

Em que: Q = Vazão de projeto do canal (m³/s); n = Rugosidade de Manning das paredes e leito (n = 0,040); A = Área molhada (m²) – Tabela 3; R_H = Raio hidráulico (m) – Tabela 3; e I = Declividade do fundo do canal (m/m).

Tabela 3 – Dimensionamento da seção hidráulica típica.

Forma da seção*	Área – A (m ²)	Perímetro Molhado – P (m)	Raio hidráulico – R_H (m)	Largura do topo – B (m)
	$y_n \cdot (b + z \cdot y_n)$	$b + 2 \cdot y_n \cdot \sqrt{z^2 + 1}$	$\frac{y_n \cdot (b + z \cdot y_n)}{b + 2 \cdot y_n \cdot \sqrt{z^2 + 1}}$	$b + 2 \cdot z \cdot y_n$

Fonte: Autores.

*Nota: b= Extensão da base (m); B = Extensão do topo (m); z = Projeção do talude; Y_n = Altura da lâmina d’água (m).

3.6.1.1 Coeficiente de escoamento superficial (*run-off*)

Para obter o valor de C, foram utilizados os dados de uso e cobertura do solo da área de estudo, obtidos da plataforma MapBiomias: coleção 8 – 2022 (MAPBIOMAS, 2022), para definição da distribuição da cobertura do solo e, logo, o grau de impermeabilização da bacia referente. Com a obtenção dos dados de cobertura e uso do solo dentro dos limites da bacia, fez-se uso do plugin *Landscape Ecology Statistics* (LecoS) no Qgis para calcular a estatística

cobertura da terra (*Land cover*) e obteve-se as estimativas de proporção para cada tipo de cobertura. Os valores de C adotados para cada tipo de cobertura foram orientados pelo Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (DNIT, 2005).

A partir disto, optou-se por aplicar a média ponderada para obter o coeficiente de escoamento superficial médio da bacia, expressa na Equação 3.

$$C_{méd} = \frac{C_1 * A_1 + C_2 * A_2 + C_3 * A_3 \dots C_n * A_n}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Em que: $C_1 \dots C_n$ = Coeficientes atribuídos a cada tipo de cobertura (adimensional); $A_1 \dots A_n$ = Áreas parciais para cada tipo de cobertura (km²); e A = Área da bacia de drenagem (km²).

3.6.1.2 Tempo de concentração

A Equação de Kirpich é bastante aplicada em bacias de pequenas dimensões e com um único segmento de fluxo como canal principal, tal qual o caso do presente estudo. Desse modo, ela é expressa pela Equação 4:

$$t_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad \text{Equação 4}$$

Em que: t_c = Tempo de concentração (min); L = Comprimento do canal principal (km); e ΔH = Diferença de cota altimétrica entre a nascente e exutório (m).

3.6.1.3 Intensidade de precipitação

As equações IDF são curvas obtidas através de uma longa série de dados pluviográfico, podendo assim gerar parâmetros que determinem a intensidade de precipitação requerida. De acordo com o Atlas Pluviométrico do Brasil (CRPM, 2014), no caso de Itaituba, os parâmetros da equação adotada para representar a família de curvas IDF são os seguintes (Equação 5):

$$i = \frac{3490,9 \times T_R^{0,1785}}{(t + 33,5)^{0,9310}} \quad \text{Equação 5}$$

Em que: i = Intensidade máxima da chuva (mm/h); T_R = Tempo de retorno (anos); e t = Duração da precipitação (minutos), equivalente ao tempo de concentração da bacia.

Tal equação foi definida com base na série histórica de dados diários de 1960 a 2013 (Pluviômetro de Itaituba, cód. ANA 00455001 e cód. INMET 82445).

4 RESULTADOS

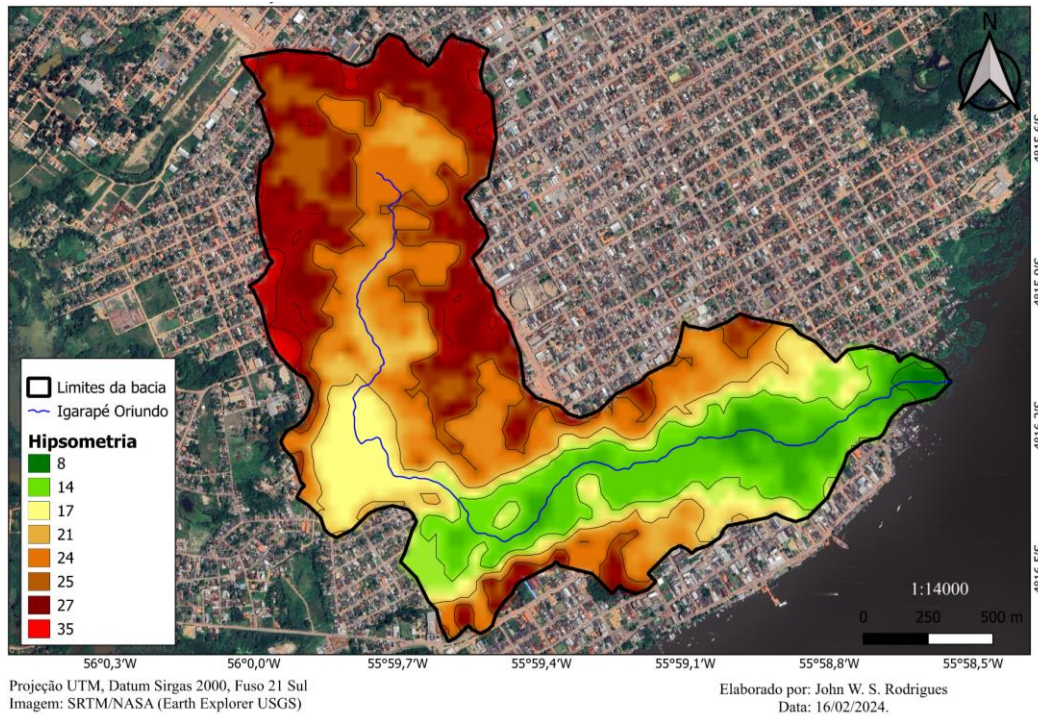
4.1 Parâmetros físicos e morfométricos

A bacia de drenagem do Igarapé Oriundo é uma sub-bacia do rio Tapajós. Possui uma área aproximada de 2,73 km², perímetro de 10,41 km e comprimento axial da bacia de 3,82 km.

Em termos topográficos, apresenta uma altitude média de 21,15 m, diferença altimétrica de 27 m e declividade média de 3,97 %. O rio principal possui uma extensão total de 4,05 km. A Figura 5 mostra o resultado da delimitação da sobredita bacia, destacando as variações altimétricas presentes no seu interior.

Definidos os valores físicos, foi possível obter os demais parâmetros morfométricos, que são apresentados na Tabela 4.

Figura 5 – Delimitação e hipsometria da bacia de drenagem do Igarapé Oriundo.



Fonte: Autores.

Tabela 4 – Índices morfométricos da bacia de drenagem do Igarapé Oriundo.

Parâmetros	Valores obtidos	Classificação
Coeficiente de Compacidade – Kc	2,76 km/km ²	Não sujeita a grandes enchentes
Fator de Forma – Kf	0,19 km/km	Não sujeita a enchentes
Razão de Elongação – Re	0,49 km ² /km	Bacia alongada menos sujeita a enchentes
Densidade de Drenagem – D _d	1,49 km/km ²	Drenagem regular
Razão de Relevo (Rr)	0,01 km/km	Baixa
Índice de Sinuosidade – Is	1,06 km/km	Canal retilíneo

Fonte: Autores.

Sabendo que a bacia em estudo possui área de 2,73 km², podemos considerá-la como de pequena dimensão (WISLER; BRATER, 1964). De acordo com Rocha (2022), no caso de bacias pequenas, as ações do homem alteram as condições de escoamento, independentemente das condições climáticas locais, através da alteração nas condições físicas da cobertura do solo, locais de drenagem e escoamento natural. Do mesmo modo, em uma bacia pequena, o escoamento superficial representa maior contribuição na vazão máxima do que o armazenamento de água no próprio curso d'água. Diante disto, a caracterização física de uma pequena bacia (como a estudada) se mostra mais influente que a caracterização climática, considerando ainda que esta reflete diretamente as condições climáticas locais.

Considerando a hipsometria da bacia (Figura 5), tem-se um relevo marcado por colinas suaves (MENEZES; SALGADO, 2018). Com a altitude média de 21,15 m e a declividade média de 3,97%, pode-se caracterizar a superfície do terreno como suave ondulado (SANTOS et al., 2018). A densidade de drenagem foi de 1,49 km/km² podendo ser considerada como mediana e esparsa (BELTRAME, 1994). O índice de sinuosidade do rio principal foi de 1,06 ou 6%, sendo caracterizado como um canal praticamente retilíneo (MANSIKKANIEMI, 1970); justificado pelo processo de “retificação” comumente empregado no processo de ocupação e observado em corpos d’água integralmente urbanos.

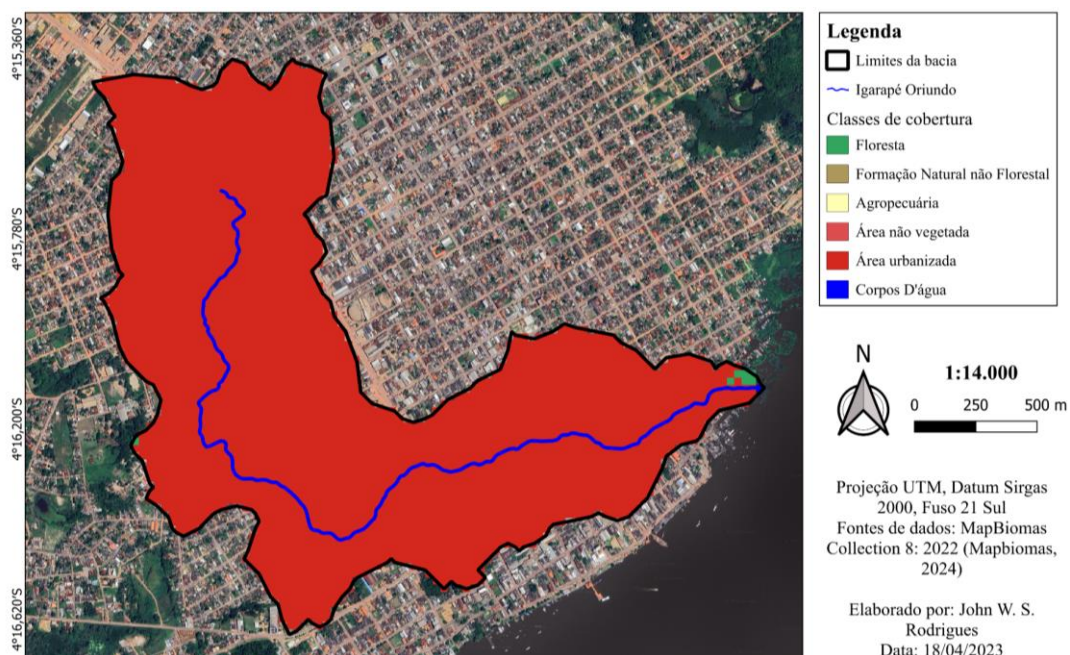
4.2 Parâmetros hidrológicos

Como parâmetro hidrológico, sabendo que se trata de uma bacia urbana de pequeno porte, optou-se por calcular a vazão máxima pelo método racional, adotado para bacias com área ≤ 3 km² (PORTO, 2006). A seguir, serão mostradas as incógnitas da equação do método.

4.2.1 Coeficiente de Escoamento Superficial – C

A Figura 6 mostra o resultado da classificação da cobertura e uso do solo na bacia de drenagem do Igarapé Oriundo, com dados do ano de 2022. Foram identificados dois tipos de cobertura na bacia em estudo: Área Urbanizada e Florestas. Observa-se que, quase a totalidade da área da bacia encontra-se urbanizada (99,77% - 2,7216 km²), enquanto 0,23% (0,0063 km²) são ocupados por cobertura em florestas, no exutório da bacia.

Figura 6 – Uso e cobertura do solo na bacia em estudo.



Fonte: Autores.

Os valores de C obtidos do Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (DNIT, 2005), foram: 0,70 para áreas urbanizadas e 0,10 para áreas em florestas. Dessa forma, o C médio calculado para a bacia foi de 0,70.

4.2.2 Tempo de concentração (tc)

O tempo de concentração calculado foi de 98,61 minutos (aproximadamente 1h39), considerando o comprimento total do rio principal de 4,05 km e a diferença altimétrica de 16,00 m ($Z_{nascente}$: 24,00 m e $Z_{exutório}$ = 8,00 m). Apesar de ser uma bacia pequena, o razoável tempo de concentração do escoamento se deve ao formato alongado da bacia, uma vez que é o tempo que a água do escoamento leva do ponto mais distante atingir a saída (exutório) do sistema.

4.2.3 Intensidade de precipitação (i)

A Tabela 5 mostra os resultados das intensidades máximas de chuva considerando o tempo de duração da chuva equivalente ao tempo de concentração da bacia (98,61 min.) e os tempos de retorno de 10 e 25 anos, utilizados para obras de macrodrenagem. As intensidades foram calculadas a partir da equação IDF de Itaituba (CPRM, 2014).

Tabela 5 – Intensidades máximas de chuvas calculadas.


TR (anos)	td = tc (minutos)	i (mm/h)
10	98,61	55,83
25		65,75

Fonte: Autores.

4.2.4 Vazão máxima (Qmáx)

As vazões máximas calculadas para os TRs de 10 e 25 anos foram 29,64 e 34,90 m³/s, respectivamente. Neste sentido, a seção hidráulica a ser considerada num eventual projeto de revitalização do Igarapé Oriundo deverá garantir o escoamento para as vazões obtidas. Assim, a Tabela 6 apresenta as dimensões calculadas para a seção hidráulica do Igarapé revitalizado, considerando as vazões obtidas com base na caracterização morfo-hidrológica da bacia.

Tabela 6 – Síntese do dimensionamento para a seção hidráulica do Igarapé revitalizado.

Proposta de revitalização para o Igarapé	Dimensionamento
	<ul style="list-style-type: none"> Para TR = 10 anos ($Q = 29,64 \text{ m}^3/\text{s}$) Considerando: $n = 0,040$, $l = 0,00395 \text{ m/m}$; $z = 1$; e $b = 9 \text{ m}$. Obteve-se o valor para $Y_n = 1,56 \text{ m}$. Assim como $A = 16,46 \text{ m}^2$, $v = 1,80 \text{ m/s}$, $B = 12,12 \text{ m}$. Para TR = 25 anos ($Q = 34,90 \text{ m}^3/\text{s}$) Considerando: $n = 0,040$, $l = 0,00395 \text{ m/m}$; $z = 1$; e $b = 9 \text{ m}$. Obteve-se o valor para $Y_n = 1,72 \text{ m}$. Assim como $A = 18,39 \text{ m}^2$, $v = 1,90 \text{ m/s}$, $B = 12,43 \text{ m}$.

Fonte: Pereira (2007, p.1) e Autores.

Considerando um acréscimo de 20% da altura da lâmina d'água (Y_n) para o bordo livre do canal, teremos profundidades de 1,87 m (Tr = 10 anos) e 2,06 m (Tr = 25 anos). Em ambos os casos, o Igarapé deverá apresentar uma largura do leito (b) de 9 m, com declividade aproximada

de 0,4%. A velocidade de escoamento (1,80-1,90 m/s), em ambos dos tempos de retorno, esteve no limite recomendado para canais com cascalho grosso, pedregulhos e piçarra.

5 CONCLUSÃO

O estudo hidrológico da presente pesquisa visou oferecer subsídios para revitalização do Igarapé Oriundo, de maneira que este possa se caracterizar como eixo principal no papel estratégico e mobilizador, para o estabelecimento de novos padrões organizacionais e zonas de ocupação em consenso com a preservação do meio.

O processo de delimitação e caracterização morfo-hidrológica da bacia de drenagem do Igarapé estudado possibilitou identificar suas características físicas e compreender os seus aspectos hidrológicos, através da obtenção e análise de dados altimétricos referentes. Quanto aos parâmetros físicos, sua área indica uma bacia de pequeno porte e, logo, mais influenciável pela caracterização físicas (e a intervenção antrópica nestas) que sua caracterização climática. O seu formato alongado implica uma menor susceptibilidade a ocorrência de enchentes. Considerando um relevo de colinas suaves e um terreno suavemente ondulado, há uma resposta hidrológica lenta, diminuindo os picos de cheia. Em contrapartida, o alto grau de impermeabilização ($C = 0,70$) implica no aumento na taxa de escoamento superficial e, logo, elevando os picos de vazão.

Vale destacar o emprego de técnicas de processamento via SIG como eficientes, tanto no processo de delimitação quanto de caracterização. Considerando o grande volume de dados e variáveis a ser definida, a metodologia apresentou precisão, economia de tempo e praticidade. Dessa forma, o uso do QGIS se apresenta como uma ferramenta viável em ações de planejamento, gestão de recursos hídricos e como suporte a tomada de decisões.

Quanto ao processo de renaturalização do Igarapé, a definição da seção hidráulica típica (4.2.4) permitiu projetar a dimensão natural do canal a ser recuperada, o que não pode ser almejado sem a desapropriação da Área de Preservação Permanente (APP) estabelecida pelo Código Florestal - Lei Federal nº 12.651 de 2012 (BRASIL, 2012), sendo essa de 30 m para corpos d'água com menos de 10 m de largura (considerando a condição atual do Igarapé).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz?** Brasília: SAG, 2011. 64 p. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/eBooks/caderno1/index.html#p=1>. Acesso em: 15 fev. 2024.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação**. Florianópolis: UFSC, 1994. 112 p.

BRASIL. **Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/551309/publicacao/15755456>. Acesso em: 01 dez. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 01 dez. 2023.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, v. 4, n. 8, p. 23-42, 1979.

CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil**: Equação IDF do Município de Itaituba-PA. Salvador: CPRM, 2014. 14 p. Disponível em: http://dspace.cprm.gov.br/bitstream/doc/17460/1/atlas_itaituba.pdf. Acesso em: 18 jan. 2024.
DNIT. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005. 133 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/715_manual_de_hidrologia_basica.pdf. Acesso em: 18 jan. 2024.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological society of America bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

IBGE. **Cidades**: Panorama do Município de Itaituba - PA. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/itaituba/panorama>. Acesso em: 27 nov. 2023.

LIMA, W. de P. **Manejo de Bacias Hidrográficas**. Piracicaba:ESALQ, 1969. 242 p.

MANSIKKANIEMI, H. The sinuosity of rivers in northern Finland: **Publicationes Instituti Geographici Universitatis Turkuensis**, v. 52, p. 16-32. 1970.

MAPBIOMAS. **Mapas de Cobertura e Uso da terra**. Mapas das Coleções, Coleção 8, 2022. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 29 dez. 2023.

MENEZES, C. R.; SALGADO, C. M. Caracterização morfométrica e de intervenções urbanas na bacia hidrográfica do rio Imboaçu (São Gonçalo, RJ): contribuição ao estudo de inundações. **Revista Formação**, Presidente Prudente, v. 25, n. 44, p. 279-299, 2018.

PEREIRA, A. R. **Recuperação e Proteção do Leito e Margem de Curso D'Água Sobre Passagem de Duto**. Deflor Bioengenharia. Nota técnica - N.º 003, mar. 2007. 1 p.

PIECADE, G. C. R. **Evolução de voçorocas em bacias hidrográficas do município de Botucatu, SP**. 161f. Tese (Livre Docência). Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, 1980.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª Ed. São Paulo: EESC USP, 2006. 520 p.

ROCHA, E. G. A. **Conceitos Básicos de Hidrologia e Drenagem para Projetos Rodoviários**. Brasília: DNIT, 2022. 49 p. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/7814/4/M%C3%B3dulo%204%20-%20Conceitos%20B%C3%A1sicos%20de%20Drenagem.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.

SCHMITT, A.; MOREIRA, C. R. Manejo e gestão de bacia hidrográfica utilizando o software gratuito Quantum-GIS. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 8, Edição Especial. p. 119-131, 2015.

SCHUBER, E. S. M.; MORAES, S. C. Desenvolvimento Regional do Tapajós: Um Olhar Sob o Cenário Socioeconômico na Região de Integração do Tapajós. **Revista De Estudos Sociais**, Cuiabá, v. 17, n. 34, p. 93-111, 2015.

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.

SCHUMM, S.A. Sinuosity of Alluvial Rivers in the Great Plains. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 74, p. 1089-1100, 1963.

SILVA JUNIOR, M. A. B. et al. Geoprocessamento aplicado à caracterização morfo-hidrológica da bacia de drenagem da barragem de Duas Unas, em Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23., 2019, Foz do Iguaçu **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: ABRH, 2019. P. 1-10.

SILVA JUNIOR, M.A.B. et al. Eventos extremos de precipitação em cidades amazônicas: uma análise dos impactos em Itaituba, sudoeste do Pará. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 25., 2023, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: ABRH, 2023. P. 1-10.

SMEDEMA, L.K.; RYCROFT, D.W. **Land Drainage: Planning and Design of Agricultural Drainage Systems**. Cornell University Press, Ithaca. New York, 1983. 376 p.

SOUZA, E. 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**, Recife, v. 14, n. 3, p. 1530-1540, 2021.

VIEIRA, L. da S. et al. Análise da vulnerabilidade social e avaliação de risco de inundação urbana de Itaituba-PA. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 9, n. 4, p. 12911–12931, 2023.

WISLER, C.O.; BRATER, E.F. **Hidrology** (Tradução e publicação de Missão Norte-Americana pela Cooperação Econômica e Técnica no Brasil). Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1964. 442 p.