

# Análise Comparativa de Metodologias de Cálculo de Tempo de Concentração: Um Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica dos Lagos Igapó em Londrina-PR

## Comparative Analysis of Concentration Time Calculation Methodologies: A Case Study of the Igapó Lakes Watershed in Londrina-PR

Renan Meira Teles \*, Andrea Sartori Jabur \*\*, Katia Valeria Marques Cardoso Prates \*\*\*

\* Department of Civil Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, renanteles@utfpr.edu.br

\*\* Department of Chemical Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, jabur@utfpr.edu.br

\*\*\* Graduate Program in Environmental Engineering, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, kprates@utfpr.edu.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v65i1.99852>

### Resumo

O tempo de concentração é um parâmetro hidrológico essencial para diversas análises hidrológicas e para o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas, podendo ser estimado por diferentes equações. Este estudo avaliou quais métodos de cálculo do tempo de concentração são mais adequados para a bacia hidrográfica dos lagos Igapó, em Londrina – PR, considerando suas características morfométricas e o uso e ocupação do solo. Inicialmente, foi realizada uma revisão dos principais métodos disponíveis, identificando aqueles aplicáveis à bacia em questão. A seleção dos métodos: Williams (1922), Haktanir e Sezen (1990), Desbordes (1974), Espey-Winslow (1966) e Federal Aviation Administration (1970), considerados os mais representativos para esta bacia foi baseada na caracterização geomorfológica da bacia. Foram analisados cinco métodos teoricamente compatíveis com suas características, porém, ao comparar os resultados, observou-se uma variação significativa nos valores estimados. Para determinar o método mais apropriado, os tempos de concentração calculados foram confrontados com parâmetros geomorfológicos e morfométricos da bacia. Os resultados indicaram que os métodos de Desbordes e do *Federal Aviation Administration* são os mais adequados para representar a realidade hidrológica da bacia dos lagos Igapó, todavia não houve validações locais diretas.

### Palavras-chave:

Bacias urbanas, Morfometria, Hidrologia, Precipitação.

### Abstract

Concentration time is an essential morphometric parameter for several hydrological analyses and for the design of hydraulic infrastructures and can be estimated by different equations. This study evaluated which methods of calculation of the concentration time are more appropriate for the

hydrographic basin of the Igapó lakes, in Londrina-PR, considering their morphometric characteristics and the use and occupation of the soil. Initially, a review of the main available methods was carried out, identifying those applicable to the basin in question. The selection of methods: Williams (1922), Haktanir & Sezen (1990), Desbordes (1974), Espey-Winslow (1966), and Federal Aviation Administration (1970), considered the most representative for this basin, was based on the geomorphological characterization of the basin. Five methods were analyzed that were theoretically compatible with their characteristics, but when comparing the results, a significant variation in the estimated was observed. To determine the most appropriate method, the calculated concentration times were compared with geomorphological and morphometric parameters of the basin, The results indicated that the methods of Desbordes and Federal Aviation Administration are the most appropriate to represent the hydrological reality of the Igapó lake basin, however, there were no direct local validations.

**Keywords:**

Urban basins, Morphometry, Hydrology, Precipitation.

---

**I. INTRODUÇÃO**

Fenômenos como a infiltração do solo, o escoamento superficial e a evapotranspiração são diretamente influenciados pela relação entre o ciclo hidrológico e as características geomorfológicas de uma bacia hidrográfica (Braga et al., 2017). Esses fenômenos possuem relação com a área, perímetro, declividade e extensões dos canais dos corpos d'água, que podem ou não contribuir com o volume do escoamento superficial ou com a capacidade de retenção ou infiltração (Santos et al., 2012). As características geomorfológicas de uma bacia hidrográfica influenciam diretamente seu comportamento hidrológico, uma vez que estão correlacionadas ao seu regime de escoamento. Entre os principais atributos geomorfológicos, destacam-se diversos parâmetros hidrológicos, como área de drenagem, forma da bacia, coeficiente de compacidade, fator de forma, ordem dos cursos d'água, densidade de drenagem e declividade. Esses parâmetros podem ser obtidos por meio da análise de mapas, fotografias aéreas e modelos digitais de elevação gerados a partir de imagens de satélite (Farias Júnior; Botelho, 2011; Braga et al., 2017).

Dentre os diversos parâmetros hidrológicos influenciados pelas características geomorfológicas, o tempo de concentração se destaca por sua relevância no dimensionamento de infraestruturas hidráulicas e na modelagem hidrológica. O tempo de concentração é definido como o tempo que a chuva que cai no ponto mais longínquo da bacia leva para chegar ao exutório, ou para que toda a bacia contribua para a vazão no exutório (Mata-Lima et al., 2007, Fang et al., 2008; Mostarda Neto et al., 2023).

O tempo de concentração é pesquisado e utilizado em estudos, análises ou projetos hidrológicos que requerem ao menos um parâmetro de resposta da bacia hidrográfica. Este parâmetro é escolhido para estas

---

pesquisas devido às suas diversas aplicações como a “implementação de sistemas de alerta contra inundações, projetos de drenagem urbana, separação do hidrograma e definição do intervalo de monitoramento hidrológico”(Mota; Kobiyama, 2015; Salis et al., 2019; Mansour; Pinheiro, 2023).

As alterações no uso e ocupação do solo influenciam diretamente o tempo de concentração. O crescimento urbano leva à maior impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração e intensificando o escoamento superficial. Esse processo faz com que as águas pluviais atinjam os canais fluviais mais rapidamente, resultando na diminuição do tempo de concentração da bacia hidrográfica (Alvarenga et al., 2019).

O estudo do tempo de concentração é fundamental para a compreensão da dinâmica do escoamento superficial, especialmente em áreas sujeitas a intensas transformações ambientais. No Brasil, eventos extremos como o aumento das chuvas na região Sul, estiagens prolongadas na Amazônia e a irregularidade pluviométrica no Nordeste vêm sendo associados às mudanças climáticas, impactando o regime hidrológico e aumentando a frequência de inundações e secas (Salvador et al., 2024).

Uma maneira eficiente de calcular o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é utilizando modelos hidrodinâmicos 3D, todavia estes modelos demandam de um alto custo computacional, grande detalhamento topográfico e de dados de uso e cobertura do solo, além de possuírem uma dificuldade em representar o escoamento superficial difuso inicial.

Como a bacia dos lagos Igapó não possui um detalhamento de dados necessário para a utilização de um modelo hidrodinâmico 3D, a presente pesquisa limita-se ao comparativo de métodos experimentais e analíticos, que resultam em equações empíricas ou semi-empíricas que são ajustadas as características físicas e hidrológicas da bacia que foi utilizada para a elaboração das equações (Almeida et al., 2014).

Como os métodos para calcular o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica são empíricos, muitos erros podem ocorrer na estimativa do tempo de concentração se esses métodos não forem selecionados e aplicados corretamente, impactando significativamente os picos de vazão ou a vazão de projeto. Sendo assim, o método escolhido deve ser apropriado para uma bacia com condições semelhantes àquelas em que o método foi originalmente desenvolvido (Mostarda Neto et al., 2023).

A escolha do método adequado para o cálculo do tempo de concentração influencia diretamente a precisão das análises hidrológicas. Um estudo realizado por Braga et al. (2017) em uma bacia hidrográfica rural no interior do Ceará, caracterizada por altas taxas de infiltração no solo, ilustra essa relevância. Os autores compararam três métodos de cálculo – Kirpich, Temez e Vem Te Chow – e concluíram que a equação de Kirpich era a mais apropriada para a bacia em questão. Os outros dois métodos apresentaram discrepâncias

significativas nos resultados, com um deles estimando um tempo de concentração 63% superior e o outro quase a metade do valor obtido pela equação de Kirpich. Esse estudo evidencia a importância de considerar as características morfométricas e climáticas da bacia hidrográfica na escolha do método de cálculo.

Na pesquisa desenvolvida por Mostarda Neto et al. (2023) os autores identificaram que a equação mais adequada para a bacia do ribeirão Itaim era a equação de Kirpich. Além disso, destacaram que a maioria dos métodos de cálculo do tempo de concentração considera como variáveis o comprimento do talvegue e a declividade equivalente. Enquanto o comprimento do talvegue apresenta uma relação diretamente proporcional com o tempo de concentração, a declividade é inversamente proporcional.

O estudo realizado por Carginin et al. (2023) analisou dez métodos de cálculo do tempo de concentração em seis bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Os resultados mostraram que a equação de Ventura foi a mais adequada para as bacias dos rios Maquiné e Santa Maria, enquanto o método de Kirpich se mostrou mais apropriado para os rios Taquari e Camaquã. Já para os rios Caí e Icamaquã, a equação de Giandotti apresentou os melhores resultados.

No estudo realizado por Silveira (2005), foram avaliadas 23 equações para o cálculo de tempo de concentração em 29 bacias hidrográficas rurais e 32 bacias urbanas. O autor conclui que algumas equações são excelentes para bacias rurais mas não apresentam resultados satisfatórios em bacias urbanas, outros métodos só apresentaram bons resultados para bacias pequenas, todavia o autor não encontrou nenhuma razão física que explicasse o contraste entre os valores obtidos pelas diferentes equações, mas ele afirma que esta variação tem relação direta com parâmetros de rugosidade e a intensidade das chuvas, ou seja, a escolha do método adequado depende diretamente do clima e das condições morfológicas da bacia estudada, e das variáveis que cada equação possui, como por exemplo a consideração de área impermeável que é fundamental para bacias urbanas.

O método para calcular o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é uma escolha que fica a critério do analista, sendo adequado a utilização de diversos métodos, sempre respeitando as características morfológicas da bacia, para então compará-los e por fim escolher aquele que melhor represente a realidade hidrológica da bacia, ou seja, é imprescindível verificar as limitações de cada modelo, seja quanto à característica de ocupação da bacia (urbana ou rural), a área, a declividade, comprimento do talvegue principal, etc (Silveira, 2005; Mata-Lima et al., 2007; Fang et al., 2008).

Portanto, os estudos que analisam equações para calcular o tempo de concentração devem evitar classificar todas as equações em um único "ranking". Em vez disso, eles devem fornecer indicadores que

possibilitem uma escolha consciente para cada situação específica, levando em consideração as características morfométricas de cada bacia hidrográfica, em geral esses indicadores são algumas características morfométricas e/ou morfológicas da bacia (Mostarda Neto et al., 2023).

Apesar das características geomorfológicas de uma bacia hidrográfica permanecerem relativamente estáveis ao longo do tempo, a conversão de áreas rurais ou de vegetação nativa em ambientes urbanos impacta significativamente o tempo de concentração. A urbanização leva à impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração e intensificando o escoamento superficial dentro da bacia hidrográfica. Essas alterações influenciam diretamente o dimensionamento de estruturas hidráulicas, que podem ser submetidas a cargas hídricas elevadas em curtos intervalos de tempo. Assim, a escolha inadequada do método para calcular o tempo de concentração pode resultar no sobre ou subdimensionamento dessas estruturas, elevando os custos de construção e comprometendo sua eficiência (Rocha et al., 2022).

Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo, avaliar quais equações para calcular o tempo de concentração mais se adequam à bacia hidrográfica dos lagos Igapó no município de Londrina – PR, levando em consideração características morfométricas e de uso e ocupação do solo dentro da bacia, a partir de um levantamento bibliográfico, onde foram identificados diversos métodos para o cálculo do tempo de concentração, conforme descrito por Silveira (2005), Mata-Lima et al. (2007), Fang et al. (2008), Salimi et al. (2017), Azizian (2018), Mostarda Neto et al. (2023) e Cargnin et al. (2023). Esses autores apresentam um mapeamento detalhado dos métodos disponíveis, indicando as características físicas que uma bacia hidrográfica deve possuir para se enquadrar em cada um deles.

## **II. MATERIAL E MÉTODOS**

### **Contextualização da Área de Estudo**

Londrina, emancipada em 1934, teve um crescimento acelerado impulsionado pela produção cafeeira, especialmente entre as décadas de 1930 e 1970. Entre 1950 e 1959, sua população saltou de 20 mil para 75 mil habitantes, período em que foi construído o primeiro lago Igapó (Câmara Municipal De Londrina, 2024). Atualmente, o município conta com 555.965 habitantes, sendo a segunda maior cidade do Paraná e a quarta da região Sul (IBGE, 2023).

A produção do espaço urbano londrinense é fruto de diversas transformações paisagísticas que ocorreram no município durante o período em que a cidade teve um aumento populacional significativo, e as

três barragens construídas no ribeirão Cambé são algumas das principais construções que mudaram a paisagem de Londrina, dando origem a reservatórios de água que são popularmente denominados como lagos Igapó.

Apesar de atualmente os lagos Igapó estarem localizados em uma região muito urbanizada, nem sempre foi assim, visto que o lago Igapó I foi inaugurado em 1959, e nesta época o entorno do lago era uma região afastada da área urbana da cidade. Em 1976 um novo represamento do ribeirão Cambé foi construído, e com isso nascia o lago Igapó II, e ao final da mesma década era construído uma terceira barragem que daria origem aos lagos Igapó III e IV, que apesar de serem popularmente considerados como dois lagos distintos, são duas partes de um mesmo reservatório separados por uma ponte (Bortolo; Fresca, 2011; Oliveira, 2018).

Desta forma, levando em consideração que a expansão urbana e sua consequente impermeabilização do solo podem acarretar uma diminuição do tempo de concentração, que nos lagos Igapó existem três barragens — uma construída no final dos anos 1950 e as outras duas no final da década de 1970 —, e que a dinâmica populacional do município de Londrina mudou significativamente desde então, fazendo com que a população mais que dobrasse desde a construção das barragens até os dias atuais (Arruda, 2018), nota-se a importância de conhecer o tempo de concentração dessa bacia, visto que ele impacta diretamente o cálculo da vazão máxima no exutório.

A pesquisa teve como área de estudo a bacia hidrográfica dos lagos Igapó no município de Londrina-PR, sendo essa uma sub-bacia do ribeirão Cambé, para escolher o método para calcular o tempo de concentração mais apropriado para a bacia hidrográfica dos lagos Igapó, primeiramente foram mapeadas as seguintes características morfométricas da bacia: área total, área urbanizada, perímetro total, diâmetro da bacia, comprimento do talvegue principal, comprimento vetorial do canal fluvial, comprimento total de todos os cursos d'água da bacia e declividade média, visto que alguns modelos de cálculo de tempo de concentração possuem restrições quanto a área, a declividade média e ao comprimento do talvegue principal, desta forma estes parâmetros servem para nortear a escolha dos métodos. O software QGIS 3.28.13 foi utilizado para obtenção dos parâmetros geomorfológicos necessários para os cálculos de acordo com as equações escolhidas.

Para entender melhor o impacto do tempo de concentração em uma bacia hidrográfica é necessário conhecer o clima da região onde a bacia está situada, desta forma, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o município de Londrina é categorizado com o clima Cfa, clima subtropical úmido, com uma temperatura média do ar no mês mais frio abaixo de 18 °C e uma temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, o clima apresenta verões quentes e poucas geadas havendo uma tendência de concentração das chuvas durante o verão, mas sem uma estação seca definida (Alvares et al., 2013; Aparecido et al., 2016).

A expansão urbana e a impermeabilização do solo influenciam diretamente o tempo de concentração da bacia, impactando o cálculo da vazão máxima no exutório. Considerando que a população de Londrina, na área da bacia hidrográfica dos lagos Igapó, teve um intenso crescimento desde a construção das barragens, torna-se essencial compreender essa dinâmica hidrológica (Arruda, 2018).

Desta forma é possível entender melhor como está ocupada a bacia hidrográfica dos lagos Igapó, localizado na região central de Londrina-PR (Figura 1).

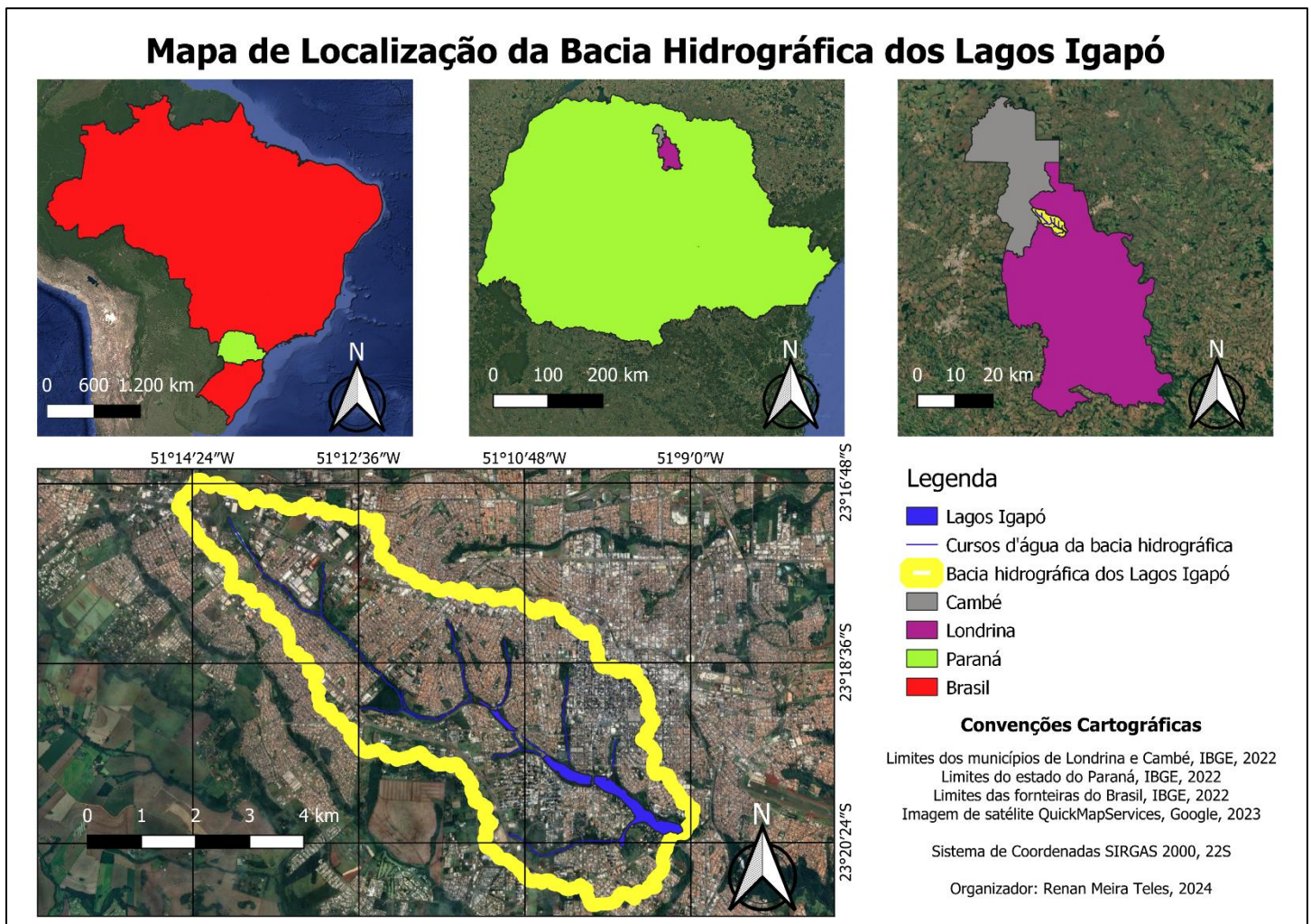


Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica dos lagos Igapó. Fonte: Autores 2025.

A análise da Figura 1 revela que a maior parte da bacia hidrográfica dos lagos Igapó está inserida em área urbana. Para compreender melhor o grau de urbanização dessa bacia, é fundamental examinar o processo de urbanização do município de Londrina

### Critérios de escolha do método para calcular o tempo de concentração

Conforme descrito anteriormente, foi realizado um levantamento bibliográfico onde foram identificados diversos métodos para calcular o tempo de concentração, dos quais se destacaram Schaake, Debordes, Espey-Winslow, *Federal Aviation Administration*, Carter e McCuen, por terem como principal fator limitante sua aplicação para bacias urbanas, porém nesta análise também foram encontrados métodos que não possuíam indicação quanto a característica de ocupação de sua bacia. O passo seguinte, utilizando o software QGIS 3.28.13, foi obter as seguintes características físicas: área total da bacia (km<sup>2</sup>), área urbanizada da bacia (%), perímetro total da bacia (km), diâmetro total da bacia (km), comprimento do talvegue principal (km), comprimento vetorial do canal fluvial (km), comprimento total dos cursos d'água (km) e a declividade média (%). Em seguida, estas características físicas foram utilizados para calcular o fator de forma, índice de sinuosidade, coeficiente de compacidade, índice de circularidade e a densidade de drenagem da bacia hidrográfica (Bortolini et al., 2021; Braga et al., 2017), apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Equações das características físicas.

Parâmetros hidrológicos	Equação	Nº da equação	Termos das Equações
Coeficiente de compacidade (Kc)	$K_c = 0,28 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$	(1)	$K_c$ – Coeficiente de compacidade; A - Área da bacia (km <sup>2</sup> ); P – Perímetro da bacia (km).
Fator de forma (Kf)	$K_f = \frac{A}{L^2}$	(2)	$K_f$ - Fator forma; A - Área da bacia (km <sup>2</sup> ); L - Comprimento do talvegue principal da bacia (km).
Índice de circularidade (Ic)	$I_c = 12,57 * \left(\frac{A}{P^2}\right)$	(3)	$I_c$ – Índice de circularidade; A - Área da bacia (km <sup>2</sup> ); P – Perímetro da bacia (km).
Índice de sinuosidade (Is)	$I_s = 100 * \left(\frac{L - L_{vetorial}}{L}\right)$	(4)	$I_s$ – Índice de sinuosidade (%); L – Comprimento total do talvegue principal (km); $L_{vetorial}$ - Comprimento vetorial do talvegue principal (km).
Densidade de drenagem (Dd)	$D_d = \frac{L_{total\ dos\ rios}}{A}$	(5)	$D_d$ – Densidade de drenagem (km/km <sup>2</sup> ); $L_{total\ dos\ rios}$ – Comprimento total dos rios da bacia (km); A - Área da bacia (km <sup>2</sup> ).

Fonte: Adaptado de Soares e Galvêncio (2020) e Vendruscolo et al.(2020).

Após o cálculo desses cinco parâmetros hidrológicos, o próximo passo foi classificá-los para compreender o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica dos lagos Igapó. Essa classificação foi realizada com base nos valores de referência apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores de referência para classificação de parâmetros hidrológicos.

Parâmetro	Unidade	Limites	Classe
Coeficiente de compacidade (Kc)	-	1,00 – 1,25 1,26 – 1,50 >1,50	Alta propensão a enchentes Tendência média a enchentes Não sujeito a enchentes
Fator de forma (Kf)	-	<0,50 0,50 – 0,75 0,76 – 1,00	Não sujeito a enchentes Tendência média a enchentes Sujeito a enchentes
Índice de circularidade (Ic)	-	0,36 – 0,50 0,51 – 0,75 0,76 – 1,00	Forma alongada Forma intermediária Forma circular
Índice de sinuosidade (Is)	%	<20 20 – 29 30 – 39,9 40 – 49,95 >50	Muito reto Reto Divagante Sinuoso Muito sinuoso
Densidade de drenagem (Dd)	Km/km <sup>2</sup>	<0,50 0,5 – 2,00 2,01 – 3,50 >3,50	Baixa Média Alta Muito alta
Declividade Média (S)	%	0 – 3 3 – 8 8 – 20 20 – 45 45 – 75	Plano Suave ondulado Ondulado Forte ondulado Montanhoso

Fonte: Adaptado de Vendruscolo et al. (2020).

Após realizar a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica dos lagos Igapó, o passo seguinte foi mapear quais equações são adequadas a estas características de bacia. Para isso foi utilizado os mapeamentos de métodos para calcular o tempo de concentração realizados por Silveira (2005); Mata-Lima et al. (2007); Fang et al. (2008); Salimi et al. (2017); Azizian (2018); Mostarda Neto et al. (2023); Cargnin et al. (2023).

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para se ter uma dimensão mais precisa do quão urbanizada essa bacia hidrográfica está foram utilizados dados da coleção 8 da plataforma MapBiomas para elaboração de um mapa de uso e ocupação do solo da bacia representado pela Figura 2.

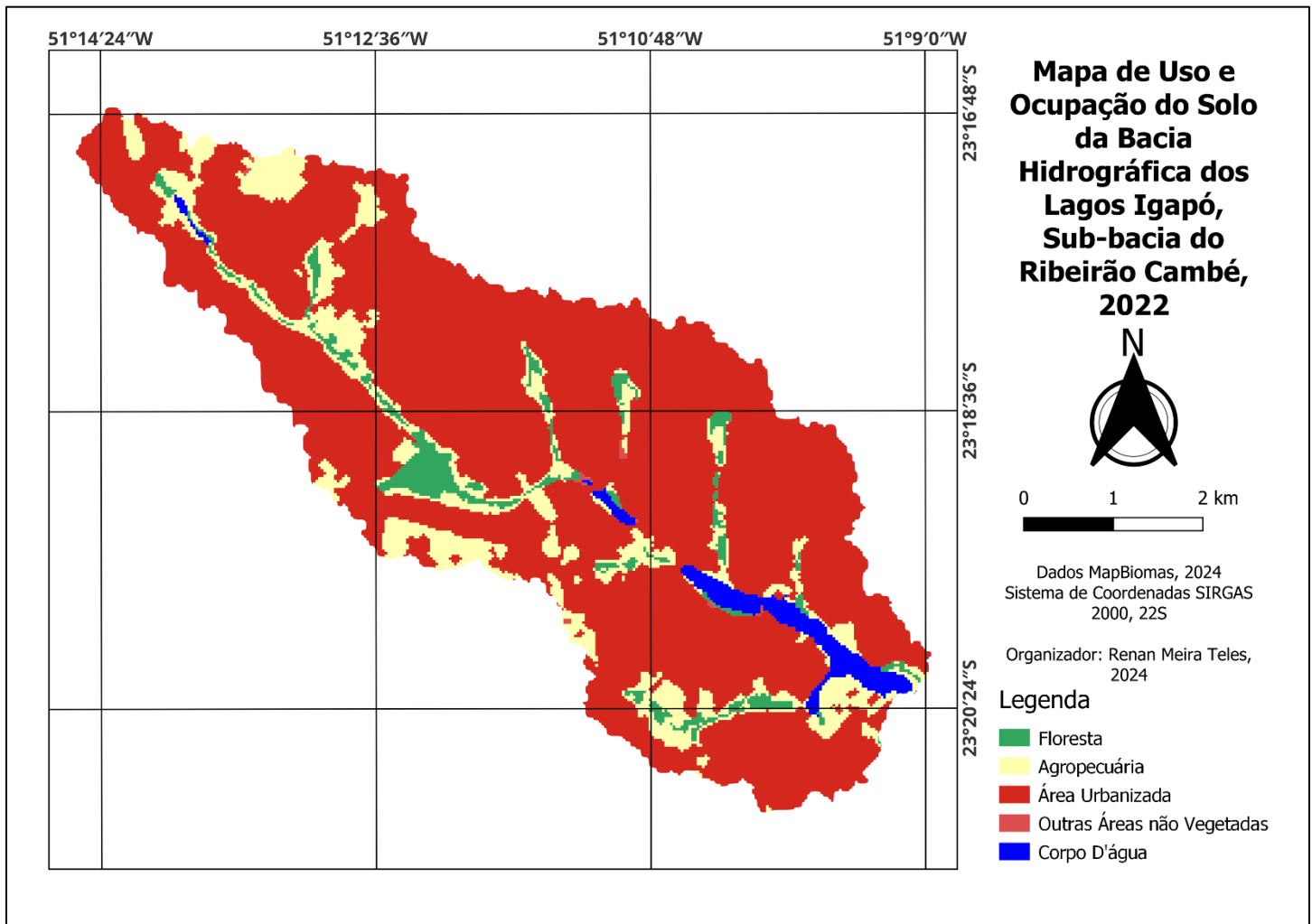


Figura 2 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica dos lagos Igapó. Fonte MapBiomas, 2024.

Com o auxílio do software QGIS versão 3.28.13, foi realizada a delimitação das áreas de uso do solo, permitindo a quantificação da urbanização presente na bacia hidrográfica dos lagos Igapó, bem como a análise da distribuição do uso e ocupação do solo nessa região (Figura 2). Em seguida cada uma das áreas mostradas na Figura 2 foram calculadas, a partir do mesmo software utilizado para elaboração do mapa, como apresentado pela Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica dos lagos Igapó no ano de 2022.

Tipo	Área (km <sup>2</sup> )
Agropecuária	4,169
Área Urbana	24,593
Corpo d'água	0,786
Floresta	1,237
Outras áreas não vegetadas	0,049
Total	30,834

Fonte: Autores, 2025.

A partir do mapa apresentado na Figura 2 foram calculados alguns parâmetros morfométricos, geomorfológicos e de ocupação da bacia hidrográfica identificados a partir do software QGIS que estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros morfométricos, geomorfológicos e de ocupação da bacia hidrográfica dos lagos Igapó

Parâmetros	Valor	Unidade
Área total da bacia	30,834	Km <sup>2</sup>
Perímetro	35,528	Km
Declividade média	0,7	%
Comprimento total do talvegue principal	11,285	Km
Comprimento vetorial do talvegue principal	10,17	Km
Comprimento total de todos os rios	23,859	Km
Diâmetro da bacia	6,266	Km
Área impermeável da bacia	80	%

Fonte: Autores, 2024

Em seguida, esses dados foram aplicados nas equações apresentadas no Quadro 1 para a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica dos lagos Igapó, tomando como base os valores de referência do Quadro 2. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros hidrológicos calculados

Parâmetros hidrológicos	Valor calculado	Unidade	Classificação
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,79	-	Não sujeito a enchentes
Fator de forma (Kf)	0,24	-	Não sujeito a enchentes
Índice de circularidade (Ic)	0,31	-	Forma muito alongada
Índice de sinuosidade (Si)	9,88	%	Muito reto
Densidade de drenagem (Dd)	0,77	Km/km <sup>2</sup>	Média
Declividade Média (S)	0,7	%	Plano

Fonte: Autores, 2024.

O coeficiente de compacidade (Kc) calculado foi de 1,79 indicando que esta bacia não tem a tendência de enchentes, o qual obteve-se o mesmo resultado pelo fator de forma (Kf) encontrado de 0,24. Estes dois valores calculados de coeficiente de compacidade (Kc) e fator de forma (Kf) sugerem que a bacia não apresenta

um formato circular, o que é comprovado com o valor obtido do cálculo do índice de circularidade ( $I_c$ ) de 0,31 que infere que a bacia hidrográfica dos lagos Igapó é muito alongada e pouco suscetível a enchentes.

Já o índice de sinuosidade de 9,88% representa um canal fluvial muito retilíneo, facilitando o escoamento superficial, e a densidade de drenagem resultou em  $0,77 \text{ km/km}^2$ , indicando que a bacia hidrográfica é medianamente drenada, e a ordem fluvial do talvegue principal da bacia de acordo com a classificação de Strahler (1957) é dois, ou seja, os afluentes do talvegue principal não possuem outros afluentes.

Apesar da bacia ter sido classificada como sem a probabilidade de apresentar enchentes, não é o que ocorre depois a intensa urbanização do local. Nos lagos Igapó há diversos registros recentes de enchentes registrados nos anos de 2007, 2011, 2013, 2016, 2017 e 2018 como relata Vacario e Machado (2019). Os autores ainda ressaltam que destes eventos os piores foram os de 2011 e 2016 quando foi registrada a ocorrência de uma fatalidade. As Figuras 3 e 4 mostram o galgamento das barragens dos lagos Igapó I e II no ano de 2011.



(a)



(b)

Figura 3 – (a) Galgamento da barragem do lago Igapó I em 2011; (b) Barragem do lago Igapó I em 2024. Fonte Adaptado de Vacario e Machado (2019, apud, Fantaussi 2011).



(a)



(b)

Figura – (a) Transbordamento da barragem do lago Igapó II em 2011; Barragem do lago Igapó II em 2024. Fonte Adaptado de Oliveira (2018, apud, Lorenzo 2011)

A enchente mais recente registrada no local foi no dia 4 de fevereiro de 2025, quando após receber uma precipitação superior a 70mm foram registrados diversos pontos de alagamento na cidade, incluindo a região dos lagos Igapó, como relatado por mídias locais<sup>1</sup>.

Dentre todos os métodos pesquisados, foram considerados como fatores limitantes a área da bacia, a declividade média, o comprimento do talvegue principal e o fato de se tratar de uma bacia urbana. Com base nesses critérios, a bacia estudada se enquadrou em cinco diferentes métodos para o cálculo do tempo de concentração: Williams (1922), Haktanir e Sezen (1990), Desbordes (1974), Espey-Winslow (1966) e Federal Aviation Administration (1970), conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Métodos para calcular o Tempo de Concentração adequados para a bacia hidrográfica dos lagos Igapó

Método	Equação	Nº da equação	Termos das Equações	Fatores Limitantes	Fonte
Williams	$T_c = \frac{0,272 * L * A^{0,4}}{D * S^{0,2}}$	(6)	Tc – Tempo de concentração (horas) L – Comprimento do talvegue principal (km) A – área total da bacia (km <sup>2</sup> ) D – Diâmetro equivalente da bacia (km) S – Declividade média (m/m)	A < 129,5 km <sup>2</sup>	Fang et al.(2008)
Haktanir & Sezen	$T_c = 0,7273 * L^{0,841}$	(7)	Tc – Tempo de concentração (horas) L – Comprimento do talvegue principal (km)	11 km <sup>2</sup> < A < 9867 km <sup>2</sup>	Fang et al.(2008)
Desbordes	$T_c = \frac{0,0869 * A^{0,3039}}{S^{0,3832} * A_i^{0,4523}}$	(8)	Tc – Tempo de concentração (horas) S – Declividade média (m/m) A – área total da bacia (km <sup>2</sup> ) Ai – área impermeável (%)	A < 51 km <sup>2</sup> S < 7 % L < 18 km Para bacias urbanas	Silveira (2005 apud, Desbordes 1974)
Espey-Winslow	$T_c = \frac{0,343 * \phi * L^{0,29}}{S^{0,145} * A_i^{0,6}}$	(9)	Tc – Tempo de concentração (horas) $\phi$ – Fator de canalização de Espey L – Comprimento do talvegue principal (km) S – Declividade média (m/m) Ai – área impermeável (%)	A < 91 km <sup>2</sup> Para bacias urbanas	McCuen et al.(1984)
FAA	$T_c = \frac{1,8 * (1,1 - C) * L^{0,5}}{i^{0,333}}$	(10)	Tc – Tempo de concentração (horas) C – Coeficiente de escoamento do método racional L – Comprimento do talvegue principal (km) i – Declividade média (%)	Método utilizado para bacias urbanas	Mata-Lima et al.(2007 apud Chow et al.1988)

Fonte: Organizado por Teles (2024).

Por fim, os valores obtidos pelos cinco métodos de cálculo do tempo de concentração foram analisados quanto à sua compatibilidade com os resultados da caracterização morfométrica da bacia. Com base nessa análise, foram determinados os métodos mais adequados para estimar o tempo de concentração na bacia hidrográfica dos lagos Igapó. Aplicando os diferentes modelos matemáticos mapeados foram alcançados os resultados apresentados pela Tabela 2 para o tempo de concentração.

<sup>1</sup> Informações obtidas na mídia local G1 Paraná (2025)

Tabela 2 – Tempos de Concentração calculados por diferentes métodos

Método	Tempo de Concentração calculado (horas)
Williams	5,208
Haktanir & Sezen	5,583
Desbordes	1,824
Espey-Winslow	0,488
FAA ( <i>Federal Aviation Administration</i> )	1,362

Fonte: Autores, 2024

Observando a Tabela 2 é possível verificar que apesar de os cinco métodos escolhidos se encaixarem de alguma maneira na bacia hidrográfica dos lagos Igapó, é importante levar em consideração como o método escolhido foi elaborado, bem como algumas características de cada método, como por exemplo a quantidade de bacias utilizadas para elaboração deste e a localização destas bacias, a fim de entender se o método escolhido foi desenvolvido a partir de bacias que se assemelham com a bacia para qual será calculado o tempo de concentração.

O método de Williams foi elaborado considerando bacias da Índia, já o modelo de Haktanir e Sezen foi feito a partir de um estudo que analisou 10 bacias diferentes na Turquia, enquanto a equação de Desbordes foi elaborada a partir de uma pesquisa que estudou 21 bacias distintas na França e os outros dois métodos foram elaborados nos Estados Unidos tendo o modelo de Espey-Winslow considerado 17 bacias e o *Federal Aviation Administration* sem um número total de bacias divulgado.

Os valores obtidos pelos métodos de Williams, Haktanir e Sezen são alto, com a duração superior a 5 horas de tempo de concentração, visto que estes métodos apesar de terem sua utilização indicada para diversos tamanhos de bacias, não apresentam resultados satisfatórios para bacias com áreas inferiores a 50km<sup>2</sup> (a bacia em estudo apresenta área de 30,834 km<sup>2</sup>), como apresentado por (Fang et al., 2008), em sua pesquisa. O período de 5 horas para o escoamento não reflete a situação real da bacia hidrográfica dos lagos Igapó, uma vez que há problemas de inundações no ponto de saída da bacia. Isso sugere que o escoamento acontece rapidamente, dificultando a infiltração. Além disso, ao considerarmos a impermeabilização do solo, percebe-se que o tempo de concentração é inferior a 5 horas.

Por outro lado, a equação de Espey-Winslow resultou em um valor baixo, onde a água da chuva chegaria muito rapidamente ao exutório, pois o tempo de concentração de 0,488 horas (29,28min) resultaria em uma velocidade de escoamento superficial superior a 5,55m/s o que representa uma bacia hidrográfica com um relevo com alta declividade, ou bacias com áreas inferiores a 5 km<sup>2</sup>. A bacia hidrográfica dos lagos Igapó possui uma declividade média de apenas 0,7% o que caracteriza um relevo plano e suave, por isso este método também não representa a realidade hidrológica desta bacia.

Desta forma, é possível afirmar que os métodos mais adequados para calcular o tempo de concentração para a bacia hidrográfica dos lagos Igapó, levando em consideração os parâmetros hidrológicos da bacia são os métodos de Desbordes e o *Federal Aviation Administration*, com valores de 1,8 a 1,3 horas. As duas equações estão de acordo com as características geomorfológicas e o uso do solo (a bacia hidrográfica analisada possui 80% de área urbana), apresentando resultados compatíveis com uma bacia de baixa sinuosidade e pouca tendência a enchentes devido à sua baixa declividade, que favorece o escoamento superficial, conforme demonstrado na análise morfométrica realizada neste estudo.

#### IV. CONCLUSÕES

Desta forma, fica evidente que o modelo escolhido deve levar em consideração além das características geomorfológicas da bacia, sua urbanização ou não, e suas características morfométrica, visto que estas representam diferentes particularidades de relevo, regime de chuvas, tipos de solo entre outras características que podem impactar no escoamento superficial e infiltração do solo.

Sendo assim o recomendado seria encontrar uma equação elaborada a partir de bacias com o maior número de semelhanças possível com a bacia hidrográfica que se deseja calcular o tempo de concentração. Contudo, nem sempre há um modelo matemático com estas características, e nestas ocasiões seria adequado calcular o tempo de concentração por diferentes métodos e fazer uma ponderação, ou para um cálculo mais seguro considerar apenas o modelo que resultar no valor mais crítico, ou seja, aquele que apresentar o menor tempo de concentração, sempre respeitando as características físicas e morfométricas da bacia, desta forma, para a bacia hidrográfica dos lagos Igapó as equações que se apresentaram mais adequadas foram as de Desbordes e o *Federal Aviation Administration*.

Apesar de os parâmetros hidrológicos apresentados, mostrarem que essa é uma bacia alongada, plana, medianamente drenada e pouco sujeita a enchentes, ainda há vários relatos de enchentes nos arredores dos lagos Igapó, provavelmente causadas pela impermeabilização do solo nesta bacia. Os métodos de Desbordes e o *Federal Aviation Administration*, são os mais indicados para estas bacias pois combinam em suas equações características morfométricas da bacia com também consideram a impermeabilização do solo. No caso da equação de desbordes esta considera a área total da bacia, a declividade média e o percentual de área impermeável, enquanto a *Federal Aviation Administration* considera o comprimento do talvegue principal, a declividade média e o coeficiente de escoamento do método racional (que leva em consideração a área

impermeável). Desta forma é possível afirmar que estes são os métodos mais adequados para se calcular o tempo de concentração desta bacia.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA Campus Apucarana e Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio financeiro.

### V. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I. K.; ALMEIDA, A. K.; AYACH, J. A.; STEFFEN, J. L.; SOBRINHO, T. A. Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: a review. São Paulo, [s. l.], v. 33, n. 4, 2014.
- ALVARENGA, D. F.; PORTILHO, D. B.; CORDEIRO, J.; THEREZO, P. E. A.; CORDEIRO, J. L.; SANTIAGO, G. L. A. Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica formada pelos cursos hídricos da região central do município de Itabira (MG). Research, Society and Development, [s. l.], v. 8, n. 4, 25 fev. 2019. DOI 10.33448/rsd-v8i4.875. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/875>. Acesso em: 3 jul. 2024.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S.; RICETTI, J.; SOUZA, P. S.; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. Ciência e Agrotecnologia, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 405–417, ago. 2016. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404003916>.
- AZIZIAN, A. Uncertainty Analysis of Time of Concentration Equations based on First-Order-Analysis (FOA) Method. American Journal of Engineering and Applied Sciences, [s. l.], v. 11, p. 327–341, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.327.341>.
- BORTOLINI, J.; SILVA, A. C. G.; MERCANTE, E.; GOMES, B. M. Identificação do grau de perigo a enchentes e inundações com base na análise morfométrica e uso do SIG aplicados na bacia hidrográfica do rio Marrecas, Francisco Beltrão –PR. 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/69805/44321>. Acesso em: 3 jul. 2024.
- BORTOLO, C. A.; FRESCA, T. M. Produção e apropriação de espaço livre público: lago igapó em Londrina-PR. Revista Geográfica de América Central, [s. l.], v. 2, n. 47E, 2011. Disponível em: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2109>. Acesso em: 3 jul. 2024.
- BRAGA, B. B.; ALMEIDA, T. R.; SCHLAEFLI, C. R. C.; DIÓGENES, C. A.; RODRIGUES, R. M. COSTA, C. A. G. Análise das características fisiográficas e do tempo de concentração da bacia do carão, Ceará. [s. l.], 2017.
- CARGNIN, B. R.; OLIVEIRA, G. G.; ANDRADES-FILHO, C. O. Desempenho de equações para tempo de concentração em diferentes bacias do Rio Grande do Sul. 2023. Disponível em:

<https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/desempenho-de-equacoes-para-tempo-de-concentracao-em-diferentes-bacias-do-rio-gr?lang=pt-br>. Acesso em: 26 jun. 2024.

FANG, X.; THOMPSON, D. B.; CLEVELAND, T. G.; PRADHAN, P.; MALLA, R. Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, [s. l.], v. 134, n. 2, p. 202–211, abr. 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:2\(202\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(202)).

FARIAS JÚNIOR, J. E. F.; BOTELHO, R. G. M. Análise Comparativa do Tempo de Concentração: Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Cônego, Município de Nova Friburgo/RJ. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, [s. l.], p. 20, 27 nov. 2011.

MANSOUR, A. L. N.; PINHEIRO, H. D. Estimativa do escoamento superficial das bacias hidrográficas urbanizadas inseridas no perímetro urbano do município de Londrina/PR. *Ciência e Natura*, [s. l.], v. 45, 11 out. 2023. DOI 10.5902/2179460X68261. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/68261>. Acesso em: 12 jul. 2024.

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H.; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. *Rem: Revista Escola de Minas*, [s. l.], v. 60, p. 525–536, set. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000300014>.

MCCUEN, R. H.; WONG, S. L.; RAWLS, W. J. Estimating Urban Time of Concentration. *Journal of Hydraulic Engineering*, [s. l.], v. 110, n. 7, p. 887–904, jul. 1984. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:7\(887\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:7(887)).

MOSTARDA NETO, N.; DE CASTRO CORRÊA, R.; CATELANI, C. S.; TARGA, M. S. Aplicação de diferentes equações para cálculo do tempo de concentração em bacias hidrográficas. *Revista Técnica Ciências Ambientais*, [s. l.], v. 1, n. 7, 13 mar. 2023. Disponível em: <https://ipabhi.org/repositorio/index.php/rca/article/view/92>. Acesso em: 28 maio 2024.

MOTA, A.; KOBIYAMA, M. Reconsiderações sobre a Fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 55–59, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p55-59>.

OLIVEIRA, C. S. Lago Igapó II, Londrina (PR): natureza, história e afeto no campo do patrimônio cultural. 2018. Mestrado em História e Fundamentos da Arquitetura e do Urbanismo – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. DOI 10.11606/D.16.2018.tde-23102018-173158. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-23102018-173158/>. Acesso em: 13 maio 2024.

ROCHA, L. A.; ALMEIDA, A. K.; MARQUES, L. S.; ALMEIDA, I. K. Influência da estimativa do tempo de concentração no dimensionamento de um reservatório de detenção. *Revista Valore*, [s. l.], v. 7, 16 set. 2022. DOI 10.22408/rev702022614e-7008. Disponível em: <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/614>. Acesso em: 3 jul. 2024.

SALIMI, E. T.; NOHEGAR, A.; MALEKIAN, A.; HOSEINI, M.; HOLISAZ, A. Estimating time of concentration in large watersheds. *Paddy and Water Environment*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 123–132, 1 jan. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0534-2>.

SALIS, H. H. C.; COSTA, A. M.; VIANNA, J. H. M.; SCHULER, A. E. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO MARINHEIRO, SETE LAGOAS - MG. Boletim de Geografia, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 186–201, 2019. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i2.36965>.

SALVADOR, M. S. S.; LUCENA, D. B.; DE SOUZA, B. I.; SAMPAIO, T. V. M.; NETO, I. O. B. Tendências de precipitação e temperatura na Região Semiárida do Brasil: estudo de caso no Cariri paraibano. 2024. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/93989/51818>. Acesso em: 26 jun. 2024.

SILVEIRA, A. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 5–29, 2005. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n1.p5-29>.

SOARES, G. A. S.; GALVÍNCIO, J. D. Uso do LiDAR para avaliar os padrões hídricos de bacias em áreas urbanas: Caracterização fisiográfica da bacia do Rio Beberibe, PE. Revista Brasileira de Geografia Física, [s. l.], v. 13, n. 07, p. 3659–3674, 31 dez. 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3659-3674>.

VACARIO, E. P. L.; MACHADO, G. Inundações urbanas em Londrina PR: um estudo da bacia do ribeirão cambé. Geografia em Questão, [s. l.], v. 12, n. 1, 6 abr. 2019. DOI 10.48075/geoq.v12i1.20136. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/geoemquestao/article/view/20136>. Acesso em: 12 jul. 2024.

VENDRUSCOLO, J.; PACHECO, F. M. P.; RODRIGUES, A. A. M.; RAMOS, H. F.; ROSA, D. M.; CAVALHEIRO, W. C. S. Características morfométricas da microbacia do Médio Rio Escondido, Amazônia Ocidental, Brasil/ Morphometric characteristics of the Médio Rio Escondido microbasin, Western Amazon, Brazil. Brazilian Journal of Development, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 565–585, 6 jan. 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-040>.

CÂMARA MUNICIPAL DE LONDRINA. História. Disponível em: [https://www.cml.pr.gov.br/cml/site/historia\\_londrina.xhtml](https://www.cml.pr.gov.br/cml/site/historia_londrina.xhtml). Acesso 7 de junho de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

G1 Paraná. VÍDEO: Homem é flagrado andando de caiaque no meio da cidade após chuva alagar Londrina. Disponível em: <https://g1.globo.com/pr/norte-noroeste/noticia/2025/02/04/homem-alagamento-chuva-londrina-paranavai.ghtml>. Acesso 20 de março de 2025.