

Identificação de áreas aptas para a instalação de empreendimentos hidrelétricos com base no modelo geomorfológico de potência fluvial

Identification of suitable areas for the installation of hydroelectric projects based on stream-power model

Alexandre Xavier Alves*, Édipo Henrique Cremon*, Fabio Corrêa Alves**, Max Well de Oliveira Rabelo*

* Instituto Federal de Goiás, e-mails: alexandreifgo@gmail.com; edipo.cremon@ifg.edu.br; maxwell.rabelo@ifg.edu.br

** Centro das Humanidades, Universidade Federal do Oeste da Bahia; e-mail: fabio.alves@ufob.edu.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v58i0.88506>

Resumo

A energia hidrelétrica depende principalmente da vazão e do desnível topográfico dos canais fluviais. Esses dois parâmetros compõem um clássico modelo geomorfológico de potência fluvial, o *stream-power*. Com base no *stream-power*, este estudo visa identificar locais com maior potencial para a instalação de empreendimentos hidrelétricos para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) na bacia do Rio Meia Ponte, centro-sul do Estado de Goiás. Para isso, foram utilizados dados hidrológicos de seis estações fluviométricas e o modelo digital de elevação Copernicus para determinar os locais com maior potência fluvial. Os resultados revelaram 161,46 km de segmentos com potencial fluvial entre 5 000 e 30 000 kW · m⁻¹ e 23 pontos caracterizados por rupturas acentuadas na inclinação do canal, com potencial favorável para a instalação de PCHs. Além das informações fluviais consideradas no presente trabalho, outros aspectos devem ser levados em conta em trabalhos futuros, como aspectos ambientais, sociais, econômicos, operacionais e culturais na busca dos melhores locais para a instalação de PCHs.

Palavras-chave:

Pequenas Centrais Hidrelétricas, *Knickpoints*, Energia, Rio Meia Ponte.

Abstract

Hydropower is mostly driven by the discharge rate and the topographic gradient of the river channels. These two parameters are the basis of a classic geomorphological theory: the stream-power model. This study aims to identify sites with the greatest potential for the installation of Small Hydroelectric Plants (SHPs) based on the stream-power model. Study area was the Meia Ponte river basin, south-central Goiás state, in Brazil. Hydrological data from six fluviometric stations and the Copernicus digital elevation model were used to determine the sites with the greatest stream-power. It was identified 161.46 km of reaches with fluvial potential between 5000 and 30000 kW · m⁻¹ and 23 knickpoints, in which there is a sharp break in the channel slope, considered as suitable

for the SHPs installation. Environmental, social, economic, operational, and cultural aspects must also be considered in the identification of the best locations for the implementation of projects that affect communities and the environment.

Keywords:

Power Generation, *Knickpoints*, QGIS, Environmental Engineering

I. INTRODUÇÃO

Usinas hidrelétricas são empreendimentos que geram grandes impactos ambientais e que têm custos sociais elevados, sendo necessário um extenso debate com a sociedade para justificá-las do ponto de vista técnico e econômico (SANTOS *et al.*, 2012). As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são uma alternativa de baixo custo e menor impacto ambiental em comparação com grandes empreendimentos hidrelétricos, que inundam uma área muito maior (ANEEL, 2021). De acordo com ANEEL (2020), são considerados PCHs os aproveitamentos hidrelétricos com potência instalada entre 5 000 kW e 30 000 kW, e que tenham menos de 13 km² de área de reservatório.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2021, o Brasil enfrentou a mais grave crise hidrológica desde a década de 1930, recebendo nos últimos sete anos um volume de água nos reservatórios das hidrelétricas abaixo da média histórica (ANEEL, 2021). Ainda de acordo com o ONS (2021), 63,1% da energia elétrica produzida no país provém de hidrelétricas (ANEEL, 2021). Isso evidencia a grande dependência que o Brasil tem dessa matriz energética e sua importância estratégica em um cenário de escassez de água no país e de migração para uma economia global voltada para as energias renováveis.

Todo o planejamento para a implantação de empreendimentos hidrelétricos, seja de grandes usinas ou de empreendimentos menores como as PCHs, precisa passar por uma análise abrangente para buscar a melhor localização para sua instalação. Nesse sentido, as geotecnologias (p.e., sensoriamento remoto, Sistema de Informação Geográfica – SIG, cartografia digital, etc.) possuem grande potencial para auxiliar na criação de cenários e na tomada de decisão final (BREUNIG *et al.*, 2019). Isto ocorre porque são de baixo custo, como os produtos orbitais derivados de multissensores em escala global ou quase global, disponíveis gratuitamente ao público; permitem a integração de diversas variáveis ambientais, sociais e econômicas em um único banco de dados geográficos; e possibilitam a análise de extensas áreas com difícil acesso a campo e em menor tempo. Alguns trabalhos já utilizaram ferramentas de manipulação e cruzamento de dados disponíveis nos SIGs para determinar áreas mais favoráveis para a instalação de empreendimentos hidroelétricos (e.g., LARENTIS *et al.*, 2010; CUYA *et al.*, 2013; TIAN *et al.*, 2020).

A avaliação inicial de locais potenciais para a instalação de centrais hidrelétricas está baseada geralmente em parâmetros de desnível topográfico e fatores hidrológicos, principalmente a declividade e o volume de água, sendo este último sendo representado pela vazão dos canais fluviais (HIDAYAH; INDARTO; WAHYUNI, 2017). Esses dois parâmetros compõem um clássico modelo geomorfológico de potência fluvial, o *stream-power* (BAGNOLD, 1966), amplamente utilizado em estudos de transporte de água e sedimentos, bem como em estudos de evolução da paisagem e processos modeladores da superfície associados ao clima, tectônica e litologia (PEIFER *et al.*, 2022). A determinação da potência fluvial pelo modelo *stream-power* é dada por:

$$\Omega = p \cdot g \cdot Q \cdot S \quad (1)$$

Onde, Ω é a potência fluvial por unidade de comprimento de fluxo ($W \cdot m^{-1}$); p é a densidade da água ($\sim 1000 \text{ kg} \cdot m^{-3}$); g é a aceleração da gravidade ($\sim 9,8 \text{ m} \cdot s^{-2}$); Q é a vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$); e S representa a declividade do canal, dada pela inclinação do segmento considerado ($m \cdot m^{-1}$). Como parâmetros para a determinação da potência fluvial, tradicionalmente, considera-se como vazão, a vazão de margens plenas (*bankfull discharge*), que é a descarga líquida capaz de preencher todo o canal até o nível da planície, e como recorte temporal utiliza-se a vazão de período de retorno de 2-3 anos (JAIN *et al.*, 2006; ROSA; FREDDUZZI; CENCETTI, 2019). Como p e g são constantes, os parâmetros que variam dessa equação são apenas o Q e S . Q tem relação direta com o parâmetro área de contribuição (A), também nomeado de fluxo acumulado em SIG, que determina a área (ou o número de pixels) que fluem hidrológicamente para cada ponto (pixel) em um modelo digital de elevação (MDE). Desta forma, é possível estimar Q a partir de A (PEIFER; CREMON; ALVES, 2020). S pode ser facilmente determinado para qualquer pixel do MDE. Sendo assim, é possível adaptar o modelo de potência fluvial a partir de dados topográficos digitais de MDEs para estudos que envolvam a identificação de trechos fluviais com potenciais hidrelétricos (TORREFRANCA; OTADOY; TONGCO, 2022).

O presente trabalho teve como objetivo identificar, a partir de análises geomorfológicas pelo modelo de potência fluvial *stream-power* baseadas em MDE, trechos com maior potencial para a instalação de PCHs na bacia hidrográfica do rio Meia Ponte, no centro-sul do Estado de Goiás.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do rio Meia Ponte está localizada na região centro-sul do Estado de Goiás, região Centro-Oeste do Brasil, na qual estão inseridos 39 municípios. Essa bacia ocupa 4,2% do território goiano e nela

reside cerca de 40% da população do estado (Figura 1). Por abastecer de forma direta atividades industriais, pecuárias, de extração mineral, agricultura e abastecimento, a bacia do Meia Ponte apresenta um cenário de grande conflito pelo uso da água (SEMAD, 2019).

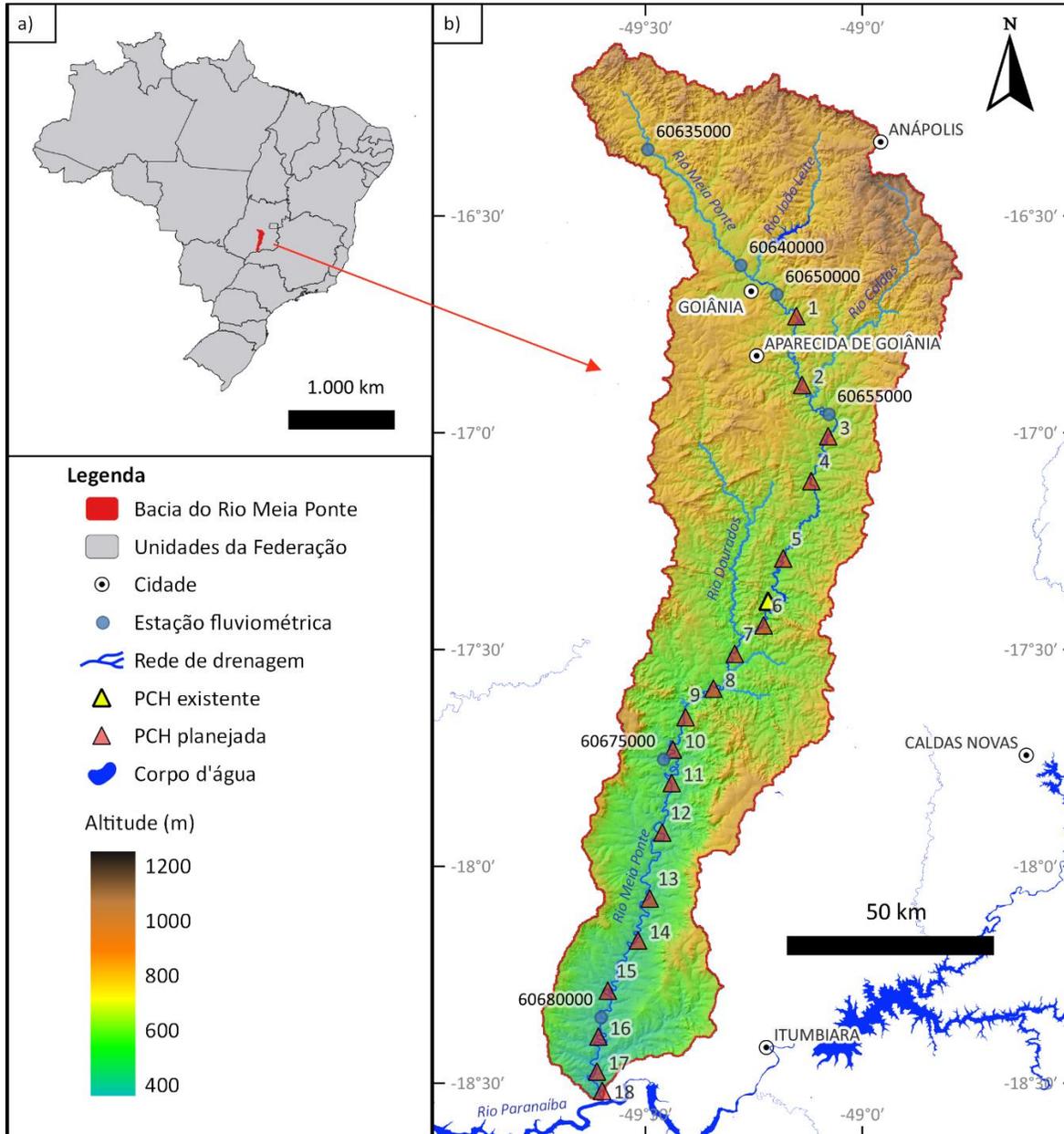


Figura 1 – Localização da bacia do rio Meia Ponte, com indicação das PCHs ativas e planejadas e estações fluviométricas instaladas ao longo deste rio. Os números de 1 a 18 correspondem a coluna ID (Identificador) da Tabela 1. Fonte: Elaboração dos autores.

Com extensão de ~560 km, desde a nascente até a sua foz no rio Paranaíba, na divisa entre os estados de Goiás e Minas Gerais, o rio Meia Ponte em seu alto curso possui um trecho de 35 km que cruza a região metropolitana de Goiânia. A altitude da bacia do rio Meia Ponte varia entre 400 e 1 140 metros. As áreas com

maiores altitudes, superiores a 1 000 m ocorrem ao norte da bacia, enquanto as menores altitudes ocorrem para sul. Existe também uma grande variação de declividade na bacia, com predomínio de regiões planas. Em grande parte da bacia prevalecem declividades inferiores a 8%, associadas a relevos planos e suave ondulados oriundos de modelados de aplainamento e acumulação ao longo das planícies e terraços fluviais. Em torno de um terço da bacia ocorrem declividades variando entre 8 e 20%, associadas a relevos ondulados, e, em menor proporção, locais com declividade superiores a 20% onde ocorrem relevos fortemente ondulados a montanhosos, relacionados com modelados de dissecação.

Na área da bacia do rio Meia Ponte predomina o bioma Cerrado, ocupando 89% de sua área total. O bioma Cerrado contém uma alta diversidade biológica, com uma vasta presença de espécies endêmicas. O outro bioma presente na bacia é o da Mata Atlântica, correspondendo apenas a 11% da área desta bacia.

O rio Meia Ponte possui uma PCH instalada (PCH Rochedo) em seu tronco principal e 18 PCHs planejadas, sendo que algumas estão em fases avançadas no processo de instalação, como é o caso da PCH Santa Rosa II e da PCH Cachoeira do Meia Ponte. A tabela 1 apresenta as PCHs planejadas, suas respectivas potências e municípios a serem atingidos. A localização das PCHs e os dados das suas respectivas potências teve como fonte a plataforma SIGEL (Sistema de Informações do Setor Elétrico), administrada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021) e o Diagnóstico da Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do rio Meia Ponte (SEMAD, 2019).

No Estado de Goiás, o rio Meia Ponte possui o maior número de estações fluviométricas com séries temporais para a realização de análises hidrológicas (SANTOS; VESPUCCI; BAYER, 2017). Segundo dados da base HidroWeb, o rio Meia Ponte possui 21 estações fluviométricas. Para a seleção das estações fluviométricas foram considerados critérios como consistência e tempo de monitoramento. Por exemplo, descartaram-se da análise estações com falhas nos dados e com monitoramento por tempo menor que 20 anos. Seguindo esses critérios, das 21 estações cadastradas no HidroWeb e que monitoram o rio Meia Ponte, apenas seis possuem dados de vazão suficientes para realizar a análise das séries históricas (Tabela 2).

Tabela 1 – PCHs planejadas para o rio Meia Ponte. Ver localização das PCHs na Figura 1.

ID	Nome	Potência (MW)	Municípios a serem atingidos
1	Vau das Pombas	5,0	Goiânia e Senador Canedo
2	Caldas	12,0	Goiânia, Senador Canedo, Aparecida de Goiânia, Bela Vista de Goiás e Hidrolândia
3	Pontal	12,0	Aparecida de Goiânia, Bela Vista de Goiás e Hidrolândia
4	Areias	7,5	Bela Vista de Goiás e Hidrolândia e Piracanjuba
5	Saltador	17,0	Piracanjuba e Professor Jamil
6	Rochedo II	11,5	Piracanjuba
7	Entre Pontes	18,0	Piracanjuba, Professor Jamil e Mairipotaba
8	Mota	26,0	Pontalina e Morrinhos
9	Chapéu	27,0	Pontalina e Morrinhos
10	Aloândia	19,0	Morrinhos e Aloândia
11	Volta Grande	20,0	Joviânia, Morrinhos e Aloândia
12	Jacaré	10,0	Joviânia, Morrinhos e Goiatuba
13	Goiatuba	18,0	Goiatuba
14	Cachoeira do Meia Ponte	29,0	Goiatuba e Panamá
15	Campo Limpo	25,5	Goiatuba, Panamá, Bom Jesus de Goiás e Itumbiara
16	Meia Ponte	22,0	Bom Jesus de Goiás e Itumbiara
17	Santa Rosa II	26,0	Itumbiara e Cachoeira Dourada
18	Tabocas	12,0	Cachoeira Dourada

Fonte: ANEEL e SEMAD (2022).

Para a estimativa das vazões de margens plenas das 6 estações fluviométricas selecionadas foi utilizado o SisCAH 1.0, que é um software desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. O SisCAH permite obter vazões máximas, mínimas e médias a partir dos dados fluviométricos disponibilizados pela ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). O programa utiliza funções de distribuição de probabilidade para estimar as vazões máximas da série de dados de entrada, como a Gumbel, Log-normal II, Log-normal III, Pearson III, LogPearson III e Weibull (BOF;

SOUSA; PRUSKI, 2009). Os dados da série temporal de cada estação foram inseridos no programa SisCAH e processados a fim de adquirir a melhor função de distribuição para estimar as vazões máximas, considerando um tempo de retorno de 3 anos.

Tabela 2 – Estações fluviométricas no rio Meia Ponte usadas neste estudo. Veja a localização das estações na Figura 1.

Nome da Estação	Código da Estação	Início	Fim	Tempo de monitoramento
Inhumas	60635000	1947	2019	72 anos
Montante de Goiânia	60640000	1975	2020	45 anos
Jusante de Goiânia	60650000	1978	2020	42 anos
Faz. Bonita de Baixo	60655000	1956	1998	42 anos
Aloândia	60675000	1975	1995	20 anos
Ponte Meia Ponte	60680000	1951	2020	69 anos

Fonte: ANA (2022).

Os dados altimétricos da área de estudo foram extraídos com base no MDE Copernicus GLO-30 (COP-30). Esses foram obtidos da plataforma OpenTopography (ESA, 2021), que disponibiliza dados altimétricos gratuitos. O MDE Copernicus possui tamanho de pixel de 1 segundo de grau (~30 metros), referenciado em sistema de coordenadas geográficas com datum horizontal WGS84 e altitudes ortométricas relativas ao modelo geoidal EGM2008, com exatidão vertical inferior a 2 m (AIRBUS, 2020). Esse MDE foi escolhido em relação aos demais MDEs disponíveis com livre acesso (p.e., SRTM, NASADEM e AW3D30), por ter apresentado os melhores resultados de qualidade altimétrica na área de estudo de acordo com estudos prévios (BETTIOI *et al.*, 2021; GUTH; GEOFFROY, 2021; CREMON *et al.*, 2022).

Após aquisição do dado de altimetria, seguiu-se para a etapa de pré-processamento. Os dados de elevação foram processados utilizando o software TerraHidro (TerraHidro Development Team, 2019). O TerraHidro permite corrigir diversas inconsistências aos dados de elevação, como por exemplo, o preenchimento de lacunas e suavização de picos, tornando o modelo digital hidrológicamente consistente com base na proposta de Jardim (2017). A partir do MDE hidrológicamente corrigido foi possível determinar: a área de contribuição da bacia de drenagem para cada pixel do MDE usando um limiar superior a 300 pixels a partir do algoritmo D-Inf (TARBOTON, 1997); extrair a rede de drenagem da bacia do rio Meia Ponte; e extrair a declividade ao longo do canal fluvial

Com base nos dados de vazão máxima (Q_{max}) obtida pelo software SisCAH e de área de contribuição extraída pelo MDE Copernicus foi possível gerar uma equação por regressão linear entre esses dados para cada estação fluviométrica. A equação resultante desta relação linear foi inserida na ferramenta nativa do software QGIS 3.22 “Calculadora Raster” para a espacialização dos valores de vazão para cada pixel do MDE. Por fim, também foi calculada a potência fluvial em $\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$ para cada pixel do MDE, utilizando os dados de vazão e declividade do canal fluvial, bem como as constantes de densidade da água e aceleração da gravidade (Figura 2).

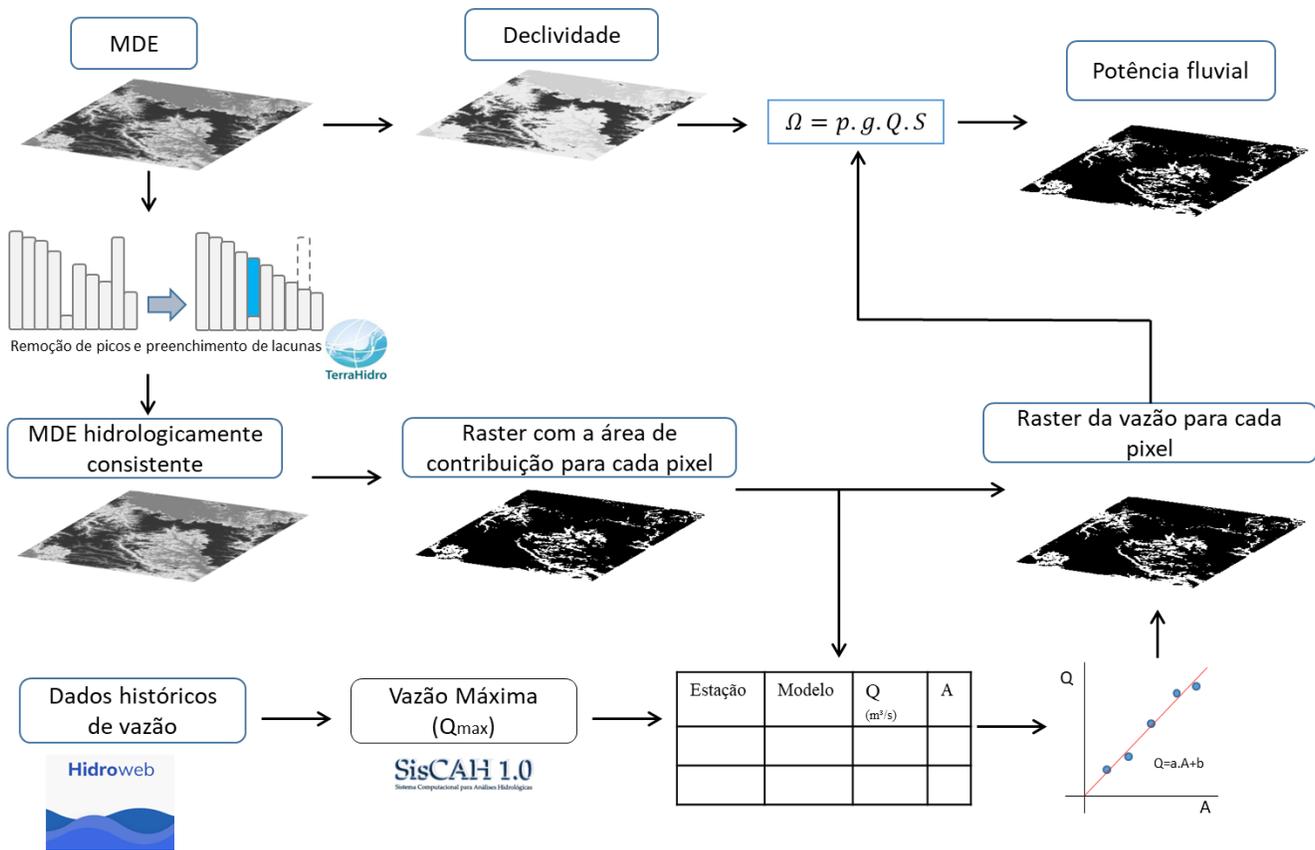


Figura 2 – Fluxograma metodológico das operações realizadas no presente trabalho. Fonte: Os autores.

Como mencionado anteriormente, para ser considerada uma PCH a usina hidrelétrica deve ter potência instalada variando entre os valores de 5 000 kW e 30 000 kW. Para verificar a adequabilidade deste critério na bacia do rio Meia Ponte, foi feita uma reclassificação dos pixels do produto de potência fluvial no intervalo de valores supracitado ao longo da rede de drenagem desta bacia com o intuito de identificar as áreas com potencial para a instalação de PCHs. Em adição à análise de identificação de áreas com potencial para a instalação de PCHs, analisou-se a localização de possíveis *knickpoints* (KIRBY; WHIPPLE, 2012) ao longo dos

principais canais fluviais da bacia do rio Meia Ponte. Em geomorfologia, um *knickpoint* corresponde a um ponto ou região específica (*knickzone*) do canal fluvial onde há uma mudança abrupta em seu gradiente (inclinação), geralmente caracterizado por cachoeira ou corredeira (BOULTON, 2020). Em geral, *knickpoints* refletem condições e processos associados à erosão do canal fluvial, induzidas por variações litológicas, climáticas e nas taxas de soerguimento da superfície. A identificação dos *knickpoints* foi feita a partir do algoritmo *knickpointfinder* implementado no aplicativo TopoToolbox (SCHWANGHART; SCHERLER, 2014; STOLLE *et al.*, 2019). Basicamente, este algoritmo compara um perfil côncavo teórico ao perfil longitudinal atual (i.e., extraído do MDE) e identifica como *knickpoints* os pontos que ocorrem acima de um limiar de deslocamento vertical (Δz) entre o perfil teórico e o atual, que é definido pelo parâmetro tolerância (“*tol*”). Para executar o processamento de forma iterativa, o algoritmo inicia a busca por *knickpoints* considerando o perfil longitudinal como um todo. Se um *knickpoint* é identificado, então o algoritmo ajusta o perfil teórico para segmentos do perfil a montante e a jusante do *knickpoint* e uma nova busca por *knickpoints* é iniciada. O algoritmo para de operar quando Δz é inferior ao valor definido pelo parâmetro tolerância. Como a tolerância varia com as incertezas inerentes aos erros de elevação do MDE nos perfis longitudinais (SCHWANGHART; SCHERLER, 2017), baixos valores de tolerância podem resultar em *knickpoints* relacionados a artefatos. Como o erro do MDE COP-30 é inferior a 2 m para a área de estudo (c.f., CREMON *et al.*, 2022), utilizou-se esse valor como limiar ótimo de tolerância para a identificação de *knickpoints* na bacia do rio Meia Ponte. Partiu-se do pressuposto de que, dentre as áreas com potencial fluvial entre 5 000 e 30 000 kW · m⁻¹, aquelas com a localização de *knickpoints* seriam naturalmente as mais favoráveis para a instalação de uma PCH. Por fim, fez-se uma comparação do produto final de potência fluvial com as localizações dos *knickpoints* e das PCHs planejadas.

III. RESULTADOS

A regressão linear entre os valores de vazões máximas com retorno a cada 3 anos e as áreas de contribuição de cada estação fluviométrica é apresentada na Figura 3. Quanto maior a área de contribuição, mais elevada é a vazão do respectivo ponto de monitoramento. Como pode ser observado na Figura 3, obteve-se um valor do coeficiente de determinação da regressão (R^2) superior a 98%, o que indica que o modelo consegue explicar boa parte dos valores observados, apesar do número restrito de observações utilizadas nesta análise.

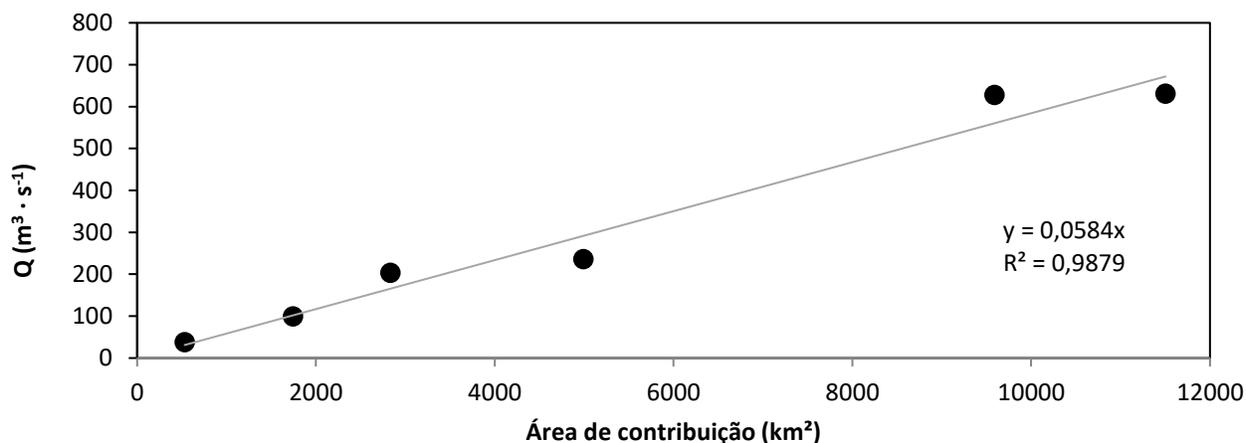


Figura 3 –Regressão linear entre os valores de vazão (Q) e área de contribuição derivada pelo MDE Copernicus. Fonte: Os autores.

Para todas as seis estações fluviométricas utilizadas neste trabalho, o modelo de distribuição indicado pelo software SisCAH 1.0 foi o Log-normal III, que tem assimetria positiva e valor não fixo superior a zero, o que o torna adequado à modelagem de vazões máximas (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Uma síntese dos valores de potência fluvial classificados para intervalos de 5 000 kW · m⁻¹ cada é apresentado na Tabela 3. Verifica-se que os trechos fluviais com potencial de fluxo entre 5 000 e 30 000 W · m⁻¹ correspondem a 161,46 km da bacia do rio Meia Ponte. Desse total, quase um terço (28%) ocorrem entre os intervalos de 5 000 e 10 000 kW · m⁻¹. Entre 10 000 e 20 000 kW · m⁻¹ há uma extensão de 62,53 km de segmentos fluviais, representando 39% do total com potência para PCHs, e 52,68 km de extensão têm potência acima de 20 000 kW · m⁻¹, o que representa 33% do total.

Tabela 3 – Síntese de intervalos de potência fluvial para a bacia do rio Meia Ponte, com valores de comprimento total dos trechos fluviais em cada intervalo de potência e porcentagem.

<i>Stream-power</i> (kW · m ⁻¹)	Comprimento (km)	Porcentagem
5 000 – 10 000	45 247	28%
10 000 – 15 000	33 831	21%
15 000 – 20 000	29 703	18%
20 000 – 25 000	26 766	17%
25 000 – 30 000	25 919	16%

Fonte: Os autores.

Ao longo da bacia de drenagem do rio Meia Ponte foram identificados 28 *knickpoints* (Figuras 4 e 5a-d), dos quais 23 ocorreram localizados no rio principal e em áreas com potência fluvial entre 5 000 e 30 000 kW ·

m⁻¹. A maior quantidade de *knickpoints* está concentrada na região central da bacia (médio curso do rio Meia Ponte; Figura 5b), entre as PCHs de Rochedo II (PCH em operação; número 6 na Figura 5) e a PCH Chapéu (ainda em fase de instalação; número 9 na Figura 5). Vale ressaltar que a PCH Rochedo II, apesar de ter apenas 4 000 kW de potência, foi classificada como sendo uma PCH com início das operações em 1955, data anterior à legislação atual, que define um limite mínimo de 5 000 Kw. Porém, a PCH de Rochedo II tem projeto em andamento de ampliação para 13 000 kW (ANEEL, 2021).

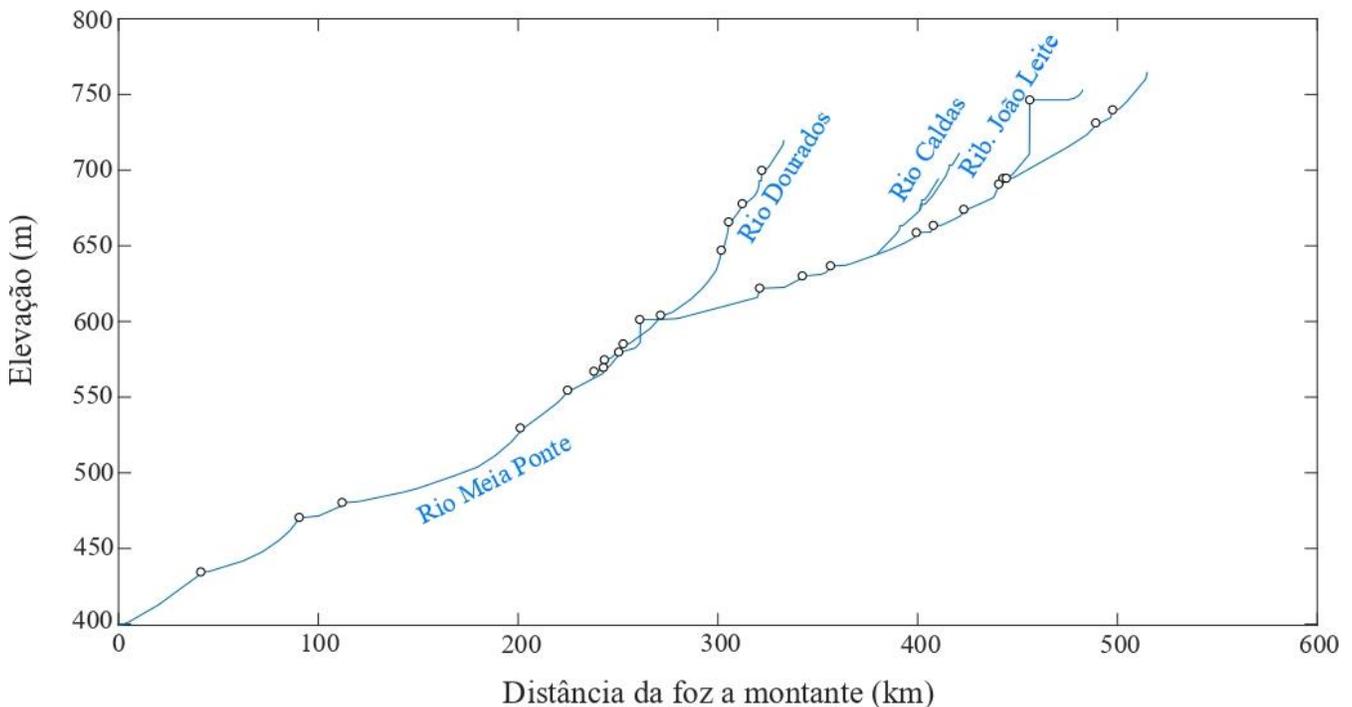


Figura 4 – Perfil longitudinal dos principais canais da bacia do rio Meia Ponte com a localização dos *knickpoints* em áreas de potência fluvial compatível com a instalação de PCHs. Fonte: Os autores.

O trecho a jusante da PCH Caldas até a PCH Saltador (números 2 e 5 na Tabela 1, respectivamente), possui seis *knickpoints* (Figura 5a). Mais a jusante da PCH Rochedo II até a PCH Chapéu (números 6 e 9 na Tabela 1), fica o trecho com a maior ocorrência de *knickpoints* do rio Meia Ponte, um total de 11 *knickpoints* (Figura 5b-c), mas que possui poucas PCHs ou projetos para aproveitamento energético. A região sul da bacia de drenagem do rio Meia Ponte também apresenta alguns *knickpoints* (Figura 5d).

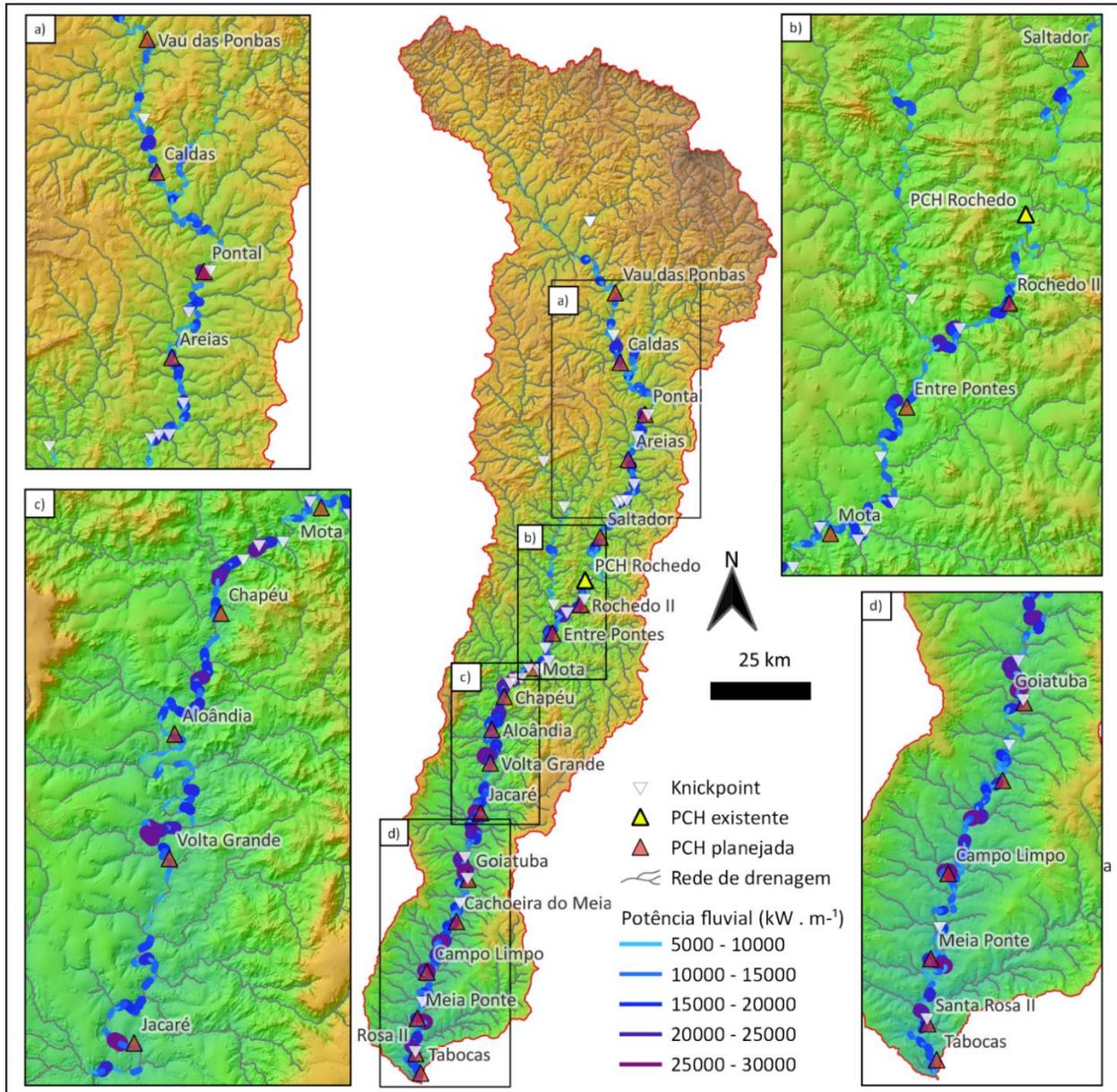


Figura 5 – Localização das PCHs (em operação e planejadas) e dos *knickpoints* ao longo da bacia do rio Meia Ponte, com segmentos de potência fluvial classificados entre os intervalos de 5 000 e 30 000 W· m⁻¹. Fonte: Os autores.

IV. DISCUSSÃO

Existe uma série de trabalhos na literatura que fizeram uso de geotecnologias para a identificação de áreas aptas para instalação de barragens hidrelétricas. Esses estudos apresentam diferentes abordagens, mas a maioria está pautada em pressupostos onde se faz uso de dados de vazão espacializada e dados de desnível topográfico (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016; ROSA; FREDDUZZI; CENCETTI, 2019; WEGNER *et al.*, 2020). A espacialização (regionalização) de vazões para uma determinada área geográfica geralmente tem sido

realizada com o uso de dados pontuais de estações fluviométricas em conjunto com dados de área de contribuição (ou fluxo acumulado) derivados de MDEs (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016), como feito neste estudo para a bacia do rio Meia Ponte. Enquanto alguns estudos concentram no uso de valores de vazão média (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016), outros têm utilizado a abordagem de utilizar 70% da vazão média anual estimada para o levantamento de potencial energético fluvial. Exemplos do uso desta última abordagem incluem os estudos de Larentis *et al.* (2010) na bacia do Taquari-Antas no Rio Grande do Sul e Wegner *et al.* (2020) na bacia do Paraná 3, oeste do Estado do Paraná. No caso do presente trabalho, entretanto, optou-se por utilizar a vazão máxima com tempo de recorrência de 3 anos, abordagem com grande potencial de aplicação, como observado em trabalhos prévios (ROSA *et al.*, 2019).

Em relação aos parâmetros topográficos, o desnível topográfico tem sido obtido pelo uso de janelas móveis sobre um MDE, calculando-se a diferença entre o pixel de maior valor com o de menor valor (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016) ou por segmentos do canal fluvial (WEGNER *et al.*, 2020). Neste trabalho optou-se por utilizar a declividade obtida diretamente sobre as elevações digitais do MDE, considerando apenas os pixels de canal fluvial para evitar a contaminação de pixels vizinhos por efeito de borda. A declividade foi utilizada como inferência da inclinação do canal para a determinação do potencial hidroenergético da bacia do rio Meia Ponte.

Parte dos trabalhos nacionais com finalidade similar a deste estudo tem adotado a formulação de definição de potencial hidrelétrico médio (kWatts) pelo produto entre a vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$), a diferença de altura entre uma seção do canal fluvial (m) e um coeficiente de eficiência adimensional, geralmente com o valor de 8,85 (LARENTIS *et al.*, 2010; WEGNER *et al.*, 2020). Neste trabalho, optou-se por trabalhar com a formulação do modelo *stream-power* (equação 1), uma vez que ele tem forte embasamento físico e vem sendo bastante utilizado em estudos geomorfológicos e geológicos de paisagens fluviais (PEIFER; CREMON; ALVES, 2020; PEIFER *et al.*, 2022; TORREFRANCA; OTADOY; TONGCO, 2022). Na prática, ambas as abordagens variam em unidade e são influenciadas pelos parâmetros vazão e inclinação do canal, já que as demais variáveis são constantes.

Abordagem similar à deste estudo foi adotada por Zaidi e Khan (2018) na bacia do rio Kunhar, norte do Paquistão, onde os autores utilizam formulação similar à da equação 1 e concluíram que o uso desse tipo de abordagem é mais vantajoso na fase de avaliação exploratória e preliminar de um projeto hidrelétrico, possibilitando restringir o escopo do estudo e focando apenas nos locais de maior potencial. No caso do presente estudo, compartilha-se de entendimento similar, visto que a abordagem empregada permitiu uma

análise exploratória de baixo custo e em menor tempo de regiões aptas para aproveitamento hidroelétrico na bacia do rio Meia Ponte. Por outro lado, é preciso ter cautela quanto aos cenários obtidos, uma vez que foram utilizados dados em escala regional e para obter um maior detalhamento a nível de projeto são necessários estudos em escalas mais finas. Porém, a análise espacial realizada do presente estudo pode servir de base para o planejamento futuro de PCHs, direcionando as atividades em locais específicos e não na totalidade da bacia hidrográfica, o que poderá minimizar custos com campanhas de campo e dimensionamento de recursos humanos.

Embora haja uma demanda em crescimento por novas matrizes energéticas renováveis no Estado de Goiás, tal como a fotovoltaica (ALVES, 2018) e de biomassa (SECIMA, 2018), o uso da matriz hidráulica por PCHs não pode ser desconsiderada, devido ao alto potencial hídrico deste estado. Além disso, o uso de geotecnologias (p.e., sensoriamento remoto e cartografia digital), conforme demonstrado neste trabalho, permitiu analisar locais mais propícios para a instalação de tais empreendimentos. Nesse sentido, a porção sul da bacia do Meia Ponte, por ser distante da região metropolitana de Goiânia e ter um preço de terreno menor em comparação com regiões mais urbanizadas, demonstra ser uma área com maior potencial para instalação de PCHs. Nessa região, onde há a localização de alguns *knickpoints* (Figura 5d), existem propostas para a instalação de duas PCHs que já se encontram em fase mais adiantada no processo de instalação e licenciamento, como é o caso das PCHs de Cachoeira do Meia Ponte e Santa Rosa II (números 14 e 17 na Tabela 1, respectivamente) (ANEEL, 2021). Adicionalmente, os trechos entre as PCHs planejadas Rochedo II e Chapéu demonstram ser setores de grande potencial energético, que podem ser mais bem analisados para construções de PCHs.

V. CONCLUSÕES

A identificação de trechos fluviais com maior aptidão para a instalação de PCHs buscou selecionar locais ao longo do rio Meia Ponte com maior potencial hídrico baseado no modelo *stream-power*, considerando alguns parâmetros físicos, como declividade e vazão, através de dados de estações fluviométricas e MDE. Com base nos resultados obtidos, observou-se que o rio Meia Ponte possui mais de 52 km de curso com potência fluvial acima de $20\,000\text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, o que representa 33% dos intervalos compatíveis para a instalação de PCHs. A princípio, esses trechos fluviais são os de maior potencial para a instalação de PCHs na bacia do rio Meia Ponte no Estado de Goiás.

Embora não tenha sido o objeto deste estudo, ressalta-se que outros aspectos ambientais, sociais, econômicos, operacionais e mesmo culturais devem ser também considerados quando se busca identificar o local mais apropriado para a implantação de PCHs, que impactam tanto as comunidades como o meio ambiente. Este trabalho demonstrou que o uso das geotecnologias para buscar conhecer locais nos quais pode haver os melhores aproveitamentos energéticos pode ser uma ferramenta poderosa de auxílio na seleção de áreas para uma investigação mais aprofundada no futuro.

Agradecimentos

ÉHC é financiado pela bolsa #310198/2022-4 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

VI. REFERÊNCIAS

- AIRBUS. Copernicus Digital Elevation Model - Product Handbook. 2.1. ed. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3ASmKZ2>. Acesso em: 05 abr 2021.
- ALVES, L. B. Energias Renováveis: análise da geração fotovoltaica no Brasil e Goiás. 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3GECUrM>. Acesso em: 04 jan 2022.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 875. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-875-de-10-de-marco-de-2020-248070610>. Acesso em: 27 jan 2022.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico - SIGEL. 2021. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/>. Acesso em: 27 jan 2022.
- BAGNOLD, R. A. An approach to the sediment transport problem from general physics. USGS Professional Paper, p. 1-42, 1966. DOI: 10.3133/pp422I.
- BETTIOL, G. M.; FERREIRA, M. E.; MOTTA, L. P.; CREMON, É. H.; SANO, E. E. Conformity of the nasadem_hgt and alos aw3d30 dem with the altitude from the brazilian geodetic reference stations: A case study from brazilian cerrado. *Sensors*, v. 21, n. 9, p. 2935, 2021. DOI: 10.3390/s21092935.
- BOF, L. H. N.; SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F. Sistema computacional para análises hidrológicas. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 13, nov 2009.
- BOULTON, S. J. Geomorphic response to differential uplift: River long profiles and knickpoints from Guadalcanal and Makira (Solomon Islands). *Front. Earth Sci.*, v. 8, p. 1–23, 2020. DOI: 10.3389/feart.2020.00010.
- CREMON, É. H.; BETTIOL, G. M.; JUNIOR, J. P. M.; MACEDO, F. C.; RABELO, M. W. O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 74, n. 3, p. 536–546, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n3-60846.
- CUYA, D. G. P.; BRANDIMARTE, L.; POPESCU, I.; ALTERACH, J.; PEVIANI, M. A GIS-based assessment of maximum

potential hydropower production in la plata basin under global changes. *Renewable energy*, v. 50, p. 103–114, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.06.019.

EUROPEAN SPACE AGENCY. Copernicus Global Digital Elevation Model. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 05 fev 2021.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO. Levantamento do potencial hidrelétrico remanescente no estado de São Paulo. 2016. Disponível em: <https://bit.ly/3KdukCF>. Acesso em: 04 jan 2022.

GUTH, P. L.; GEOFFROY, T. M. Lidar point cloud and icesat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. *Transactions in GIS*, v. 25, n. 5, p. 2245–2261, 2021. DOI: 10.1111/tgis.12825.

HIDAYAH, E.; INDARTO; WAHYUNI, S. Proposed method to determine the potential location of hydropower plant: application at rawatamtu watershed, east java. *Procedia engineering*, v. 171, p. 1495–1504, 2017.

JAIN, V.; PRESTON, N.; FRYIRS, K.; BRIERLEY, G. Comparative assessment of three approaches for deriving stream power plots along long profiles in the upper Hunter River catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, v. 74, n. 1-4, p. 297–317, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.08.012.

JARDIM, A. C. Direções de fluxo em modelos digitais de elevação: um método com foco na qualidade da estimativa e processamento de grande volume de dados. 133 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017-04-07 2017. Disponível em: <http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3NT7EN5>. Acesso em: 27 set. 2021.

LARENTIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; OLIVERA, F.; TUCCI, C. E. M. GIS-based procedures for hydropower potential spotting. *Energy*, v. 35, n. 10, p. 4237–4243, 2010. DOI: 10.1016/j.energy.2010.07.014.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Escassez Hídrica. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20210707-escassez-hidrica-2021.aspx>. Acesso em: 27 jan 2022.

PEIFER, D.; CREMON, É. H.; ALVES, F. C. Ferramentas modernas para a extração de métricas de gradientes fluviais a partir de mdes: uma revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 1, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1732

PEIFER, D.; CREMON, É. H.; VAL, P.; FERNANDES, N. F. Bases teóricas do modelo stream-power de incisão fluvial. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 2, p. 1512–1523, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i2.2143.

ROSA, P.; FREDDUZZI, A.; CENCETTI, C. Stream power determination in gis: An index to evaluate the most sensitive points of a river. *Water*, v. 11, n. 6, p. 1145, 2019. DOI: 10.3390/w11061145

SANTOS, T.; SANTOS, L.; ALBUQUERQUE, R.; CORRÊA, E. Belo Monte: impactos sociais, ambientais, econômicos e políticos. *Tendências*, v. 13, n. 2, p. 214-227, 2012.

SANTOS, J. G. R.; VESPUCCI, A. G.; BAYER, M. Estações fluviométricas do estado de Goiás: qualificação dos dados hidrológicos disponíveis na base HIDROWEB/ANA. *Ateliê Geográfico*, v. 10, n. 3, p. 89–108, 2017. DOI: 10.5216/ag.v10i3.35554.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, RECURSOS HÍDRICOS, INFRAESTRUTURA, CIDADES E ASSUNTOS METROPOLITANOS - GOVERNO DO ESTADO DE GOIÁS (SEMAD). Planos de Recursos Hídricos das Unidades de

Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Goiás Afluentes ao Rio Paranaíba, Diagnóstico da UPGRH do Rio Meia Ponte. 2010. Disponível em: <http://pbapgo.meioambiente.go.gov.br/>. Acesso em: 27 jan 2022.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, RECURSOS HÍDRICOS, INFRAESTRUTURA, CIDADES E ASSUNTOS METROPOLITANOS - GOVERNO DO ESTADO DE GOIÁS (SEMAD). Caracterização da Bacia do Rio Meia Ponte. 2019. Disponível em: https://www.meioambiente.go.gov.br/noticias/1592-bacia_meiaponte.html. Acesso em: 27 jan 2022. 6, 10

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences, *Earth Surf. Dynam.*, v. 2, p. 1–7, 2014. DOI: 10.5194/esurf-2-1-2014.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. Bumps in river profiles: uncertainty assessment and smoothing using quantile regression techniques, *Earth Surf. Dynam.*, v. 5, p. 821–839, 2017. DOI: 10.5194/esurf-5-821-2017.

STOLLE, A.; SCHWANGHART, W.; ANDERMANN, C.; BERNHARDT, A.; FORT, M.; JANSEN, J.D.; WITTMANN, H.; MERCHEL, S.; RUGEL, G.; ADHIKARI, B.R.; KORUP, O., 2019. Protracted river response to medieval earthquakes. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 44, n. 1, p. 331-341, 2019. DOI: 10.1002/esp.4517.

TARBOTON, D. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, v. 33, p. 309–319, 1997. DOI: 10.1029/96WR03137.

TerraHidro Development Team. TerraHidro. 2019. Disponível em: <http://wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=download>.

TIAN, Y.; ZHANG, F.; YUAN, Z.; CHE, Z.; ZAFETTI, N. Assessment power generation potential of small hydropower plants using GIS software. *Energy Reports*, v. 6, p. 1393–1404, 2020. DOI: 10.1016/j.egy.2020.05.023

TORREFRANCA, I; OTADOY, R. E.; TONGCO, A. Incorporating Landscape Dynamics in Small-Scale Hydropower Site Location Using a GIS and Spatial Analysis Tool: The Case of Bohol, Central Philippines. *Energies*, v. 15, n. 3, 1130, 2022. DOI: 10.3390/en15031130.

WEGNER, N.; MERCANTE, E.; MENDES, I. S.; GANASCINI, D.; CORREA, M. M.; MAGGI, M. F.; BOAS, M. A. V.; WRUBLACK, S. C.; SIQUEIRA, J. A. C. Hydro energy potential considering environmental variables and water availability in paraná hydrographic basin 3. *Journal of Hydrology*, v. 580, 124183, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124183

ZAIDI, A. Z.; KHAN, M. Identifying high potential locations for run-of-the-river hydroelectric power plants using gis and digital elevation models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 89, p. 106–116, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.02.025