

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA DO RIO PARAIBUNA — MINAS GERAIS, PELOS MÉTODOS HIDROLÓGICOS.

Líria Hévylin da Silva Teles¹ ; Monica Pertel²

Abstract: With the growing demand for the use of water resources and the resulting environmental degradation, concerns about water availability and quality have increased, considering its essential importance for society and ecosystems. In this context, understanding ecological flow becomes fundamental for the sustainable management of water resources, as it represents the minimum flow necessary to maintain aquatic ecosystems, directly contributing to the preservation of the ecological integrity of water bodies. Given this, the objective of this study is to evaluate the ecological flows of the Paraibuna River Basin, located in Minas Gerais, in order to support more efficient and sustainable water resource management. The study involved mapping the basin's main rivers and their tributaries using the ArcGIS platform. Additionally, fluvimetric data obtained from the Hidroweb portal were analyzed using the following hydrological models: flow duration curve, Montana method, and probabilistic assessment of Q_{7,10} flows. The resulting flow curves were compared to the stretches with Water Use Rights Permits issued by the environmental agency of the state of Minas Gerais (IGAM) and by the Federal Government, determining the available flow through the water balance analysis. The results showed variations at different analyzed points, with a sensitive point identified in the municipality of Juiz de Fora, which presented a water availability of only 23% of its granted flow. However, in the overall balance of the basin, the results were positive, indicating that it has the capacity to meet both current and future water demands.

Resumo: Com o crescimento da demanda pelo uso dos recursos hídricos e a consequente degradação ambiental, aumentou a preocupação com a disponibilidade e a qualidade da água, considerando sua importância essencial para a sociedade e os ecossistemas. Nesse contexto, o conhecimento da vazão ecológica torna-se fundamental para uma gestão sustentável dos recursos hídricos, uma vez que representa a vazão mínima necessária para a manutenção dos ecossistemas aquáticos, contribuindo diretamente para a preservação da integridade ecológica dos corpos d'água. Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar as vazões ecológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraibuna, em Minas Gerais, visando subsidiar uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos. O trabalho consistiu no mapeamento dos principais rios da bacia e seus afluentes por meio da plataforma ArcGIS. Paralelamente, foram analisados dados fluviométricos obtidos no portal Hidroweb, aplicando os seguintes modelos hidrológicos: curva de permanência, método Montana e avaliação probabilística das vazões Q_{7,10}. As curvas de vazão resultantes foram comparadas aos trechos com outorga de direito e de uso de recursos hídricos licenciada pelo órgão ambiental do estado de Minas Gerais (IGAM) e pela União, obtendo a vazão disponível pelo balanço hídrico. Os resultados indicaram variações nos diferentes pontos analisados, destacando-se um ponto sensível no município de Juiz de Fora, que apresentou disponibilidade de apenas 23% da sua vazão outorgável. Entretanto, no balanço geral da bacia, os resultados foram positivos, indicando que ela possui capacidade para atender tanto às demandas atuais quanto às futuras.

Palavras-chave: Vazão de referência, Balanço hídrico, Outorgas de direito de Uso de Recursos Hídricos.

¹⁾ Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. E-mail lika123@poli.ufrj.br

²⁾ Professora Adjunta da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. E-mail: monicapertel@poli.ufrj.br

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/1997) representa um marco na gestão das águas, promovendo o uso sustentável e organizado dos recursos hídricos. Esse tema ganha ainda mais relevância com o Novo Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040, que reforça a importância da gestão nas bacias hidrográficas e destaca o papel dos Comitês na tomada de decisão. Nesse contexto, a academia tem papel fundamental em apoiar os Comitês, desenvolvendo estudos e projetos que contribuem para decisões mais assertivas, como é o caso da avaliação de vazões em corpos hídricos. A vazão ecológica possibilita identificar a disponibilidade de água local que pode permitir possíveis usos futuros de captação e aproveitamento (Vestena, 2012), sendo uma informação essencial para definição de trechos passíveis de licenciamento e outorga.

A vazão ecológica corresponde à quantidade de água que deve permanecer no leito dos rios para atender às demandas da biota aquática, funcionando como um valor de referência que assegura o resguardo da fauna e da flora associadas ao corpo hídrico (Collischonn, 2006; Cruz, 2005). Inicialmente, buscava-se definir um fluxo mínimo fixo, porém, com o avanço dos estudos (Collischonn et al., 2005; Quist e Schultz, 2014), verificou-se que essa abordagem não preserva adequadamente os ecossistemas, considerando que o regime hidrológico dos rios é dinâmico e se altera ao longo dos dias, meses e anos (Guedes, 2013; Collischonn, 2006). As metodologias de cálculo são classificadas como hidrológicas, hidráulicas, de habitat e holísticas, sendo que este estudo foca na métodos hidrológicos, que determinam a vazão ecológica a partir da análise de séries fluviométricas, buscando recomendar regimes de fluxo que conservem a magnitude, frequência, duração e sazonalidade dos eventos de cheia e estiagem (Souza, 2009). A partir do cálculo das vazões ecológicas obtém-se as de vazões de referência, que representa um valor de vazão utilizado para avaliar o ato de outorga de direitos de uso de água em um curso d'água (ANA, 2019), e com base nesse valor é determinada a disponibilidade hídrica.

A Sub-bacia Hidrográfica Rio Paraibuna está inserida na Bacia do Rio Paraíba do Sul que está localizada nas regiões mais desenvolvidas do país, a qual está entre São Paulo (13.900 km²), Minas Gerais (20.700 km²) e Rio de Janeiro (20.900 km²). Logo, a zona de influência da bacia engloba áreas metropolitanas onde deve-se ter uma atenção maior no gerenciamento da qualidade e disponibilidade de seus recursos de forma que haja quantidade suficiente para suprir as demandas do ecossistema e do uso antrópico.

Esta pesquisa pretende contribuir com as políticas públicas de gestão de recursos hídricos ao passo que busca comparar os trechos outorgáveis da bacia do Paraíba do Sul com curvas de vazão outorgável calculadas por diferentes métodos hidrológicos, a saber: Montana, curva de permanência e avaliações probabilísticas das vazões Q_{7,10}. O entendimento do corpo hídrico, sua dinâmica e suas particularidades contribuem para uma melhor tomada de decisão e um melhor aproveitamento de recursos, informações fundamentais para um comitê de bacias.

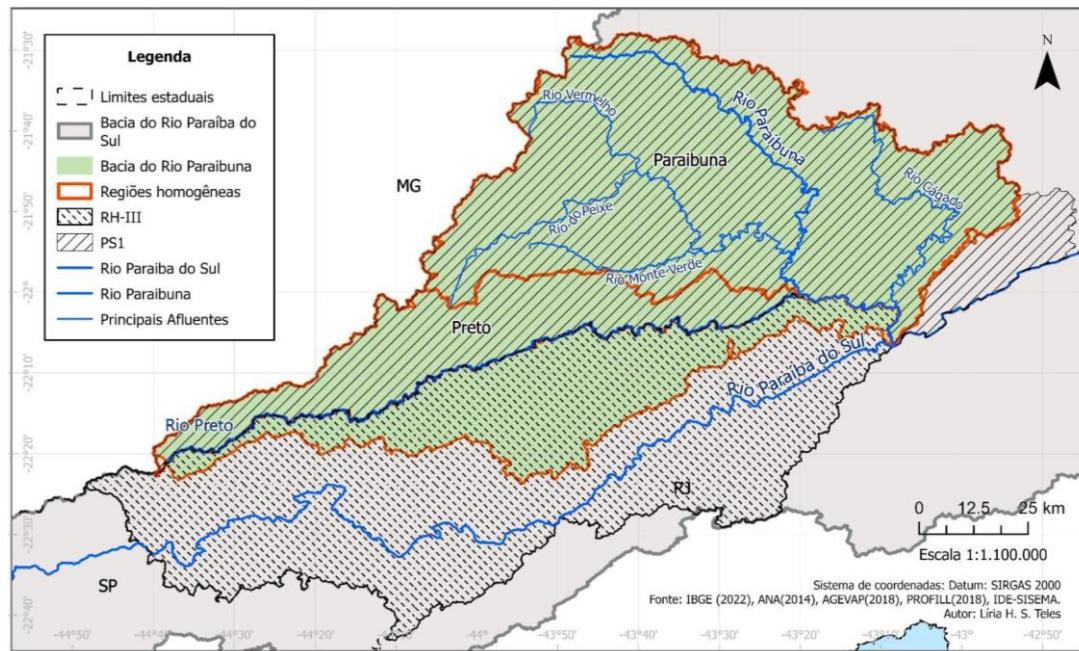
2 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraibuna abrange os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, totalizando uma área de 8.592 km². Embora existam divergências entre estudiosos sobre qual seria o principal rio da bacia, o Rio Paraibuna atualmente é considerado o principal. A bacia está inserida em duas Unidades de Planejamento, Figura 1. A primeira, a PS1, abrange a Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Preto e Paraibuna, e sua gestão é realizada pelo Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Preto e Paraibuna. Com uma área total de 7.185,99 km², a PS1 cobre 6.705 km² da Bacia do Rio Paraibuna. A parte restante da bacia, que corresponde a 1.887 km², está inserida na Unidade de Planejamento RHII, gerida pelo Comitê de Bacia Hidrográfica do Médio Paraíba do Sul (CBH - Médio Paraíba do Sul). Essa unidade possui uma área total de 6.429 km², dos quais aproximadamente 30% correspondem à Bacia do Rio Paraibuna.

De acordo com a CPRM (2017), a bacia pode ser dividida em duas regiões hidrológicas e estatisticamente homogêneas. As duas regiões hidrológicas foram nomeadas Paraibuna e Preto. A primeira região refere-se ao curso principal do Rio Paraibuna e engloba os afluentes Rio do Peixe, Rio Cágado e Rio Monte Verde (também conhecido como Santa Bárbara). A segunda região corresponde ao curso principal

do Rio Preto. Neste estudo, optou-se por fazer o recorte da bacia que abrange somente a primeira região do curso principal do Rio Paraibuna, nomeando-a como Bacia da Região do Rio Paraibuna (BRPB).

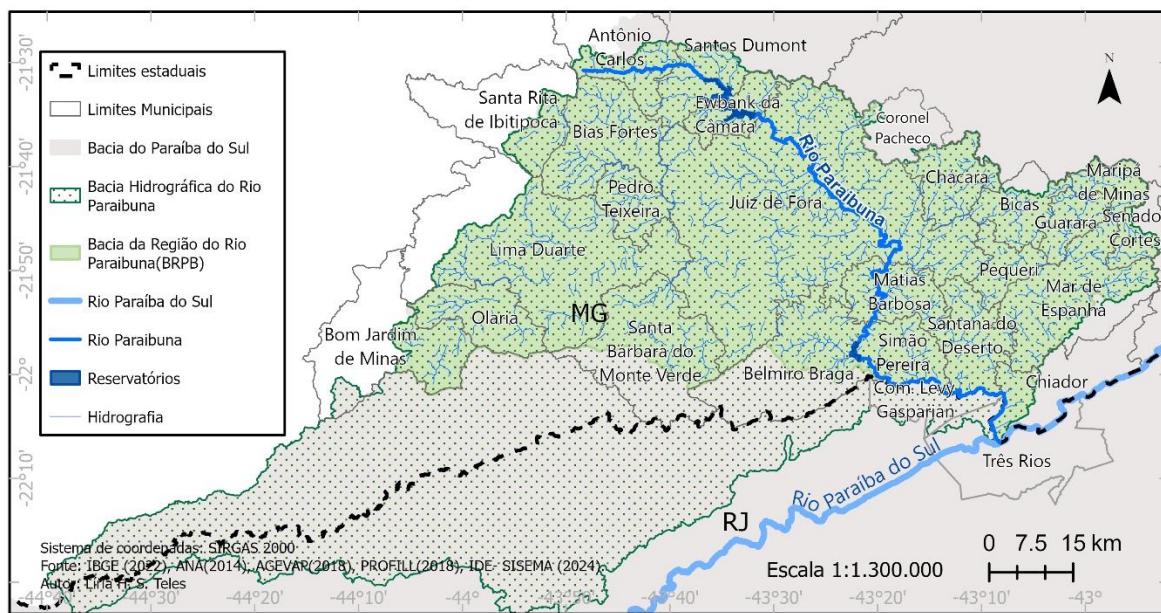
Figura 1 — Localização da Bacia do Rio Paraibuna.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A BRPB cobre uma área de 5.182 km², interceptando 23 municípios de Minas Gerais e 2 municípios do Rio de Janeiro, conforme ilustrado na Figura 2. O Rio Paraibuna é o maior afluente em volume de água do Paraíba do Sul, possui um comprimento total de cerca de 170 km. Suas nascentes estão localizadas na Serra da Mantiqueira, no município de Antônio Carlos, a uma altitude de 1.180 metros. A partir daí, seu curso segue até a divisa com Santos Dumont, percorrendo aproximadamente 30 km. Nesse ponto, o rio muda para a direção, passando por Juiz de Fora a 680 metros de altitude.

Figura 2 — Municípios interceptados pela Bacia da Região do Rio Paraibuna.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Depois de Juiz de Fora, o Rio Paraibuna recebe, pela margem direita, as águas do Rio do Peixe e do Rio Preto, e pela margem esquerda, as águas do Rio Cágado. Após este ponto, o rio passa a fluir de norte para sul até sua foz no Rio Paraíba do Sul, localizado no município de Três Rios. O trecho final do curso do

Rio Paraibuna, com cerca de 44 km de extensão, marca a divisa entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (CEIVAP, 2007). Conforme a Resolução ANA 399/2004, o Rio Peixe é classificado como de domínio federal, enquanto o Rio Paraibuna é considerado federal apenas no trecho a jusante da confluência com o Rio do Peixe. Da nascente até esse ponto, o Rio Paraibuna é classificado como estadual (CEIVAP, 2015).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa foi dividida em etapas, sendo a primeira a delimitação da bacia de interesse. A partir disso, foi realizada a análise de consistência das bases de dados. Em seguida, definiu-se os pontos de análise e, para cada um deles, foram calculadas as vazões com o software SisCAH. As etapas seguintes consistiram no cálculo do balanço hídrico e da disponibilidade hídrica.

3.1 Delimitação das Bacias

O primeiro passo da pesquisa foi a delimitação das bacias de interesse. A Bacia da Região do Rio Paraibuna foi delimitada a partir dos arquivos disponibilizados pela AGEVAP – Associação Pró-Gestão Das Águas Da Bacia Hidrográfica Do Rio Paraíba Do Sul, que por meio de seu um portal de downloads concede acesso público para o Banco de dados do Sistema de Informações Geográficas Web das Bacias Hidrográficas (SIGA WEB), no qual o usuário tem acesso a um banco de dados espaciais com grande volume de dados sobre a bacia. Neste sistema, é possível escolher entre as camadas (layers) disponibilizadas para download em formato ESRI shapefile (*.shp). Além destes foram necessários os arquivos disponibilizados pela base de dados geoespacial do estado de Minas Gerais nomeada de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISSEMA), onde foi possível obter os shapefiles das curvas de nível do estado de Minas Gerais e dos Ottotrechos de drenagem da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Com esses arquivos e o uso do software ArcGis Pro 3.3.0, foi possível fazer a representação precisa da área de estudo.

3.2 Banco de dados

3.2.1 Dados hidrometeorológicos

Através do Portal Hidroweb, foi possível encontrar os dados das estações fluviométricas. Após uma pré-filtragem dos dados no próprio site, selecionando apenas os dados da Sub-Bacia do Paraíba do Sul, esses dados foram plotados no ArcGIS Pro 3.3.0. As estações que estavam fora dos limites das Bacias de interesse foram excluídas.

Para localizar as estações que possuíam séries históricas de vazão, foi feita a consulta de cada estação na base Web Service disponibilizada pela ANA em seu portal de dados abertos. Com base nos resultados, foram eliminadas as estações fluviométricas que não continham dados sobre vazão, e então foram selecionadas as estações de interesse.

3.2.2 Dados de Outorga de uso de Recursos Hídricos

Pelo site do Cadastro Nacional de Recursos Hídricos (CNARH) que disponibiliza dados do Sistema Federal de Regulação de Usos – REGLA, foi possível obter os dados das outorgas superficiais de domínio estadual e de domínio da União existentes na bacia. Devido ao grande volume de dados, a filtragem foi realizada no ArcGIS 3.0, onde foi possível aplicar a filtragem espacial para as regiões de interesse. Além disso, esses dados foram tratados utilizando a linguagem de estruturação de dados SQL (Structured Query Language) dentro do ArcGIS, de forma a obter as outorgas superficiais que não apresentassem situação inválida ou não outorgável. Após a filtragem, a tabela gerada foi exportada para a elaboração das planilhas que compõem o cálculo do balanço hídrico.

Além dos dados do CNARH, foi necessário obter os dados estaduais sobre a relação dos usuários de recursos hídricos. O IGAM disponibiliza os dados de outorga por meio do IDE-SISEMA, em formato Shapefile, permitindo acesso aos registros de outorgas realizadas pelo IGAM e aos dados de outorgas de uso insignificante do estado. Para as outorgas do órgão gestor, foi necessário realizar a filtragem espacial nas regiões de interesse no ArcGIS. Posteriormente, os dados foram cruzados com os obtidos no CNARH para eliminar cadastros repetidos e obter o maior número de interferências válidas. Os parâmetros considerados na elaboração das planilhas de balanço hídrico foram: a jurisdição da interferência (qualificada

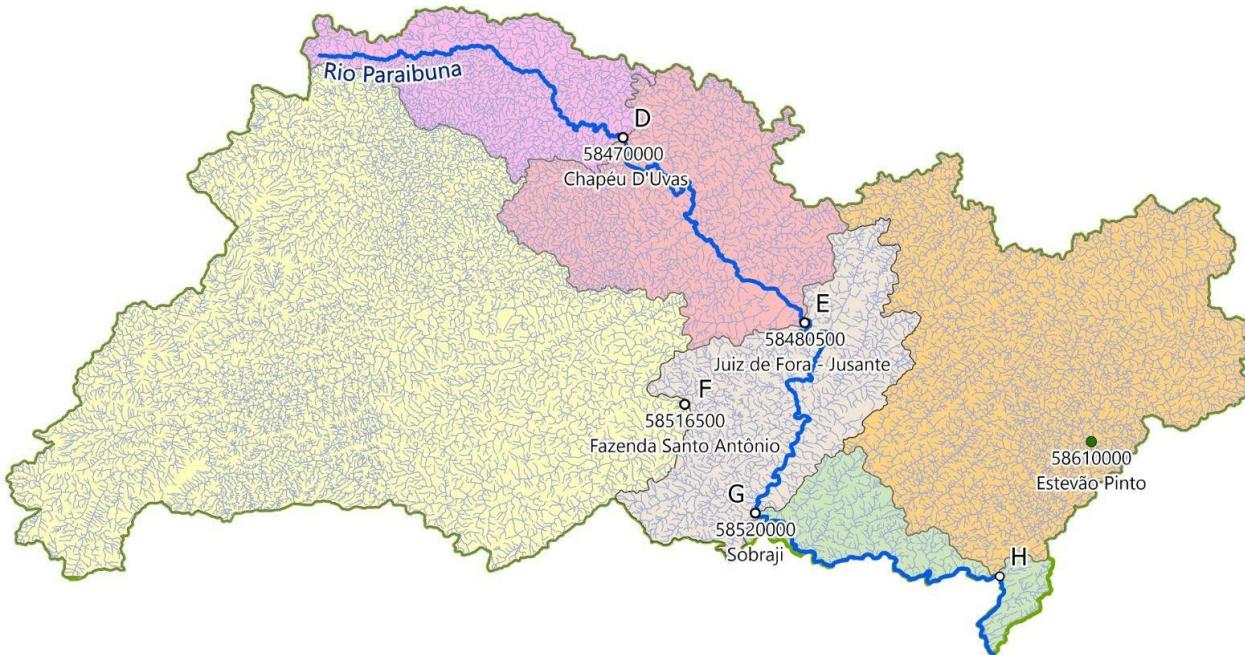
como estadual ou federal); o município (local da interferência); as coordenadas geográficas; o tipo de interferência (podendo ser captação ou lançamento); e a vazão máxima e média. Em alguns casos, havia barragens com uso consuntivo, que foram consideradas no balanço como captação.

3.3 Determinação dos pontos de análise

A definição dos pontos de análise foi realizada de forma estratégica, levando em consideração a correlação entre as outorgas de captação e lançamento e as estações fluviométricas com dados disponíveis. A partir dos pontos foram traçadas as suas respectivas áreas de contribuição com o auxílio do software ArcGis Pro 3.3.0 e utilizando a hidrografia e as curvas de nível conectando os pontos mais elevados.

A área de contribuição do ponto D, destacada em rosa na Figura 3, corresponde à bacia situada mais a montante do Rio Paraibuna, sendo formada exclusivamente pela drenagem que chega até a estação Chapéu D'Uvas. Já a bacia de contribuição do ponto E é composta pela soma da área da bacia do ponto D (em rosa) com a área adicional destacada em vermelho, representando a contribuição incremental até a estação Juiz de Fora – Jusante. Por sua vez, a bacia de contribuição do ponto G corresponde à junção das bacias dos pontos E e F, acrescida da área parcial destacada em bege, abrangendo toda a margem direita do e parte da calha principal do Rio Paraibuna. Por fim, a bacia do ponto H, destacada em laranja, representa a sub-bacia do Rio Cágado, um dos principais afluentes da margem esquerda do Rio Paraibuna. As informações referentes aos pontos de análise se encontram no Quadro 1.

Figura 3 — Estações e Pontos de Análise na Bacia da Região do Rio Paraibuna



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Quadro 1 — Pontos de Análise na BRPB

Pontos	Município	Coincide com a estação	Nome da estação	Localidade da estação	Código da estação	Total de Outorgas
D	Juiz de Fora	Sim	Chapéu D'Uvas	Juiz de Fora	58470000	44
E	Juiz de Fora	Sim	Juiz de Fora - Jusante	Juiz de Fora	58480500	184
F	Juiz de Fora	Sim	Fazenda Santo Antônio	Juiz de Fora	58516500	179
G	Belmiro Braga	Sim	Sobraji	Belmiro Braga	58520000	441
H	Entre Santana do Deserto e Chiador	Não	Estevão Pinto	Mar de Espanha	58610000	113

Fonte: Elaboração própria, 2024.

3.4 Obtenção das vazões

Para realizar o cálculo das vazões ecológicas utilizando os diversos métodos apresentados nesta pesquisa, foi empregado o Sistema Computacional para Análises Hidrológicas desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa. Este software possibilita a importação de dados dos arquivos obtidos no site da Agência Nacional de Águas (ANA), tanto no formato TXT quanto no formato MDB. Além disso, dentro do próprio programa, é viável realizar o pré-processamento de séries históricas, incluindo o tratamento de dados ausentes ou inconsistentes, bem como a validação e correção de erros. Para isso, o usuário pode escolher o início do ano hidrológico e o percentual de falhas, sendo adotado neste estudo um percentual de falhas de até 5% e o início do ano hidrológico em outubro.

Através desses dados, o programa é capaz de obter estatísticas básicas de vazões mínimas, médias e máximas, além do cálculo da Curva de Permanência. Para o cálculo das vazões mínimas, ele realiza o ajuste dos dados a cinco funções de distribuição de probabilidade: Weibull, Pearson 3, Log-Pearson 3, Log-normal II e Log-normal III, identificando qual melhor se ajusta aos dados. Esse mecanismo foi utilizado para o cálculo da $Q_{7,10}$, já que o programa permite o ajuste do tempo de recorrência para 10 anos com duração de 7 dias. Neste estudo, são adotadas as distribuições de probabilidade que melhor se ajustarem aos dados, obtendo assim a vazão $Q_{7,10}$ em cada ponto de análise.

A curva de permanência é calculada a partir da frequência com que diferentes valores de vazão foram excedidos em um curso d'água durante um determinado período. O SisCAH organiza esses valores em ordem decrescente, em intervalos de 5%, retornando a porcentagem do tempo em que a vazão do rio ficou acima de um determinado valor. A partir disso, é possível determinar a vazão associada aos tempos de permanência. Já o cálculo da vazão média de longa duração QMLT, utilizada no Método de Tennant, também foi calculada pelo programa na seção de médias.

5.5 Balanço Hídrico

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica é uma análise que quantifica as entradas e saídas de água na região. Esse cálculo foi realizado com base na análise dos usuários de recursos hídricos existentes na bacia. Para isso, foram elaboradas duas planilhas para cada bacia de contribuição de cada ponto de análise: uma com as outorgas de captação, contendo dados de vazão máxima, e outra com as outorgas de lançamento, que traz informações sobre a vazão média. Assim, é possível identificar o cenário mais crítico da bacia.

Os dados foram obtidos a partir dos bancos de dados estaduais e do CNARH, sendo consolidados excluindo-se as outorgas referentes a barragens para geração de energia e outros usos não consuntivos. Além disso, no estado de Minas Gerais, as outorgas de dragagem para extração mineral são consideradas usos consuntivos, conforme o Decreto nº 47.705, de 04/09/2019, e, portanto, suas vazões foram tratadas como captações na realização do balanço.

5.6 Cálculo Disponibilidade Hídrica

Para calcular a disponibilidade hídrica, é necessário determinar a vazão no trecho em análise e definir a vazão de referência, que, conforme os métodos aplicados, correspondem às vazões Q_{95} , $Q_{7,10}$ e QMLT. Com base nessas vazões, é possível definir a vazão outorgável. A primeira vazão foi aplicada utilizando a metodologia de outorga de vazões do estado do Rio de Janeiro, com 40% da Q_{95} . Já nos estados de São Paulo e Minas Gerais é aplicada a vazão outorgável de 50% da $Q_{7,10}$. A última vazão será comparada com

a metodologia adotada nos estados, utilizando os valores de 10%, 20% e 30% da QMLT, para avaliar as condições de estado “Faixa ideal” do corpo hídrico, conforme a metodologia Tennant.

Após a obtenção desses dados, é possível calcular a vazão disponível, que resulta da subtração da vazão máxima de captação e da adição da vazão média de lançamentos à vazão outorgável, conforme descrito na Equação 1.

$$Q_{disponível} = Q_{outorgável} - Q_{máx\ captação} + Q_{med\ lançamento} \quad (1)$$

Para os pontos de análise que não coincidem com a estação fluviométrica, foi necessário aplicar o método de regionalização de vazões, que envolve a correlação de áreas, conforme mostrado na Equação 2, sendo aplicado nos pontos C, H, J e K.

$$Q_{ponto} = Q_{estação} (A_{ponto} / A_{estação}) \quad (2)$$

Onde Q_{ponto} é a vazão disponível no ponto de análise (m^3/s), $Q_{estação}$ a vazão no ponto da estação fluviométrica (m^3/s), A_{ponto} é a área da bacia de contribuição do ponto de análise (km^2) e $A_{estação}$ é a área da bacia de contribuição da estação fluviométrica (km^2).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a consistência do banco de dados de outorga foi possível diagnosticar que na bacia de contribuição da margem direita do Rio Paraibuna existem 427 interferências de captação, sendo 16 de domínio federal, e 9 interferências de lançamento, das quais apenas 1 é estadual, totalizando 436 interferências. O maior uso é destinado à captação para o abastecimento público, responsável por captar 32,44% da vazão outorgada, através de 13 interferências. Em segundo lugar, a categoria "outros" utiliza 27,16% da vazão, retirada que é distribuída em 65 interferências. O uso para mineração ocupa a terceira posição, captando 21,42% da vazão por meio de 41 interferências, seguido pela atividade industrial, que utiliza 10,05% da vazão através de 54 pontos de captação. Os demais usos e suas respectivas quantidades de interferências estão detalhados no Quadro 2.

Quadro 2 — Outorgas existentes na BRPB.

Finalidade e Uso	Margem direita do Rio Paraibuna			Margem esquerda do Rio Paraibuna		
	Q(m^3/s)	Percentual	Interferências	Q(m^3/s)	Percentual	Interferências
Abastecimento Público	6314,84	32,44%	13	846,70	56,21%	5
Aquicultura	54,4	0,28%	23	23,4	1,55%	7
Consumo Humano	615,49	3,16%	99	57,90	3,84%	29
Dessedentação Animal	165,96	0,85%	72	50,50	3,35%	24
Industrial	1956,22	10,05%	54	34,20	2,27%	6
Irrigação	889,8	4,57%	57	379,30	25,18%	15
Mineração	4169,81	21,42%	41	37,20	2,47%	8
Outros	5285,61	27,16%	65	77,20	5,12%	19
Serviços	11,59	0,06%	3	-	-	-
Total	19463,72	100,00%	427	1506,40	100,00%	113

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Na bacia que representa a margem esquerda do Rio Paraibuna existem 113 interferências de captação, todas de domínio estadual, e não há interferências de lançamento. O maior uso na bacia é destinado à captação para abastecimento público, que através de 5 interferências, retira 56,21% da vazão de captação outorgada. Em seguida, o uso para irrigação é responsável por 25,18% da vazão, captada por meio de 15 pontos de interferência. O uso classificado como "Outros" ocupa o terceiro lugar, representando 5,12% da vazão, distribuído em 19 interferências. O consumo humano corresponde a Consumo Humano 3,84% das captações por meio de 29 pontos de captação. Existem 24 pontos destinados à dessedentação animal que correspondem a 3,35% da vazão retirada do corpo hídrico. A mineração corresponde a 2,47% da vazão captada, com 8 pontos de interferência. O uso industrial, com 6 interferências, representa 1,85% da vazão captada. Por fim, a aquicultura corresponde a 1,55% da vazão captada, por meio de 7 interferências.

Pelo SisCAH foi possível obter as vazões Q_{95} , $Q_{7,10}$ e QMLT, dispostas no Quadro 3, tendo em vista que no Ponto H o resultado disposto já está regionalizado.

Quadro 3 — Vazões de referência obtidas através do software SisCAH.

Ponto	Estação	Série histórica	Descartados	Área (km²)	Regionalizada	Q95 (m³/s)	Q7,10 (m³/s)	QMLT (m³/s)
D	Chapéu d'Uvas	1949 - 2021	-	360	Não	3,27	2,08	8,03
E	Juiz de Fora - Jusante	1975 - 2021	-	969	Não	8,62	6,95	20,19
F	Fazenda Santo Antônio	1976 - 2021	-	2240	Não	15,30	10,80	44,71
G	Sobräßi	1952 - 2021	1953 - 1955	3717	Não	28,90	22,24	71,4
H	Estevão Pinto	1932 - 2021	1942/43 e 2009/10	1125	Sim	7,13	5,55	20,23

Fonte: Elaboração própria, 2024.

A análise dos resultados do balanço hídrico apresentados no Quadro 4, revelam algumas observações importantes sobre as condições hídricas nas sub-bacias estudadas, considerando diferentes métodos hidrológicos.

Quadro 4 — Vazões disponíveis de acordo com a vazão de referência.

Sub-bacia	Demanda Hídrica atual	Vazões disponíveis por vazão de referência									
		ERJ		ESP e EMG		Tennant					
		40%Q95		50%Q7,10		10% QMLT		20%QMLT		30%QMLT	
		(m³/s)	(m³/s)	%	(m³/s)	%	(m³/s)	%	(m³/s)	%	(m³/s)
Ponto D	0,69	0,62	47%	0,35	34%	0,11	14%	0,92	57%	1,72	71%
Ponto E	2,67	0,77	22%	0,80	23%	-0,65	-68%	1,37	34%	3,38	56%
Ponto F	0,42	5,70	93%	4,98	92%	4,05	91%	8,52	95%	12,99	97%
Ponto G	5,23	6,33	55%	5,89	53%	1,91	27%	9,05	63%	16,19	76%
Ponto H	0,42	2,43	85%	2,35	85%	1,60	79%	3,63	90%	5,65	93%

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Inicialmente, observa-se que a vazão correspondente a 10% da QMLT é geralmente a mais restritiva entre as vazões de referência, estando abaixo das demais em quase todos os pontos analisados. Esta restrição é especialmente notável nos pontos D e E da BRPB, onde a vazão 10%QMLT atinge valores de 0,11 m³/s e -0,65 m³/s, respectivamente. O valor negativo observado no Ponto E indica uma indisponibilidade hídrica severa, sugerindo que, sob essas condições, a garantia do fornecimento dos recursos hídricos seria comprometida.

A vazão Q_{7,10}, que é utilizada como referência em São Paulo e Minas Gerais, também se mostra restritiva na maioria dos pontos. Contudo, há algumas exceções, como no ponto E, onde a vazão Q_{7,10} supera a vazão Q₉₅, adotada no Rio de Janeiro. Além disso, ao analisar as vazões 20%QMLT e 30%QMLT (método de Tennant), nota-se que estas são as mais elevadas em todos os pontos, com valores consideravelmente superiores às demais vazões de referência. No Ponto G, por exemplo, a 30%QMLT atinge 16,28 m³/s, indicando mais do que o dobro da vazão disponível às vazões Q₉₅ (6,42 m³/s) e Q_{7,10} (5,98 m³/s). Esse padrão sugere que, sob condições de menor disponibilidade, o método de Tennant poderia permitir a ocorrência frequente de desabastecimento devido à permissividade de usos mais intensivos da água, porém, essa abordagem deve ser considerada com cautela devido ao seu potencial impacto ambiental e econômico. A tabela revela que as condições de disponibilidade hídrica variam significativamente entre os pontos analisados e que a escolha do método hidrológico pode impactar diretamente a definição das vazões outorgáveis com o objetivo de garantir o abastecimento.

O Ponto D, por exemplo, apresenta a menor área de contribuição dentre os analisados logo tem a menor vazão dentre ele, mas um ponto interessante de se analisar é que a vazão obtida pela Q_{7,10} (0,35 m³/s) encontra-se 56% abaixo da vazão disponível pela Q₉₅, que é de 0,62 m³/s, o que pode refletir em uma oferta de vazão outorgável reduzida. A vazão de 10% da QMLT atinge apenas 0,11 m³/s, o que representa um risco significativo de desatendimento se essa vazão for utilizada como referência para outorga. No Ponto E, a adoção de 10% da QMLT como vazão outorgável implicaria em um valor negativo (-0,65 m³/s), evidenciando que essa vazão não seria suficiente para suprir as demandas atuais. No entanto, com a utilização das vazões Q_{7,10} e Q₉₅, a disponibilidade hídrica resultante é positiva, garantindo o atendimento

das demandas dos usuários existentes e possibilitando a entrada de novos usuários.

7 CONCLUSÃO

O cálculo da disponibilidade hídrica é fundamental para a gestão dos recursos, servindo de base para decisões sobre uso e preservação em bacias hidrográficas. No presente estudo, analisou-se a bacia da região do rio Paraibuna, da bacia do Rio Paraíba do Sul, observando-se variações nos resultados conforme o método aplicado. A escolha do método de cálculo da vazão de referência é decisiva, pois influencia diretamente a definição da vazão outorgável e remanescente. Por isso, foram comparados três métodos — curva de permanência, Q7,10 e Método Montana —, visando avaliar seus impactos e contribuir para modelos de outorga mais seguros e adequados à realidade da bacia, equilibrando oferta e demanda de água.

Destaca-se que a Q7,10 é o método mais conservador, pois reflete situações críticas de escassez, enquanto a Q95, embora restritiva, pode suavizar as estimativas, subestimando cenários extremos. Já o Método Tennant, baseado na QMLT, apresenta variações consideráveis (entre 10% e 30%), podendo superestimar ou subestimar a preservação, dependendo do cenário adotado. Apesar disso, a comparação dos métodos utilizados nos estados do RJ, SP e MG revelou que a variação média da disponibilidade hídrica entre eles é de aproximadamente 7%, indicando que, na maioria dos pontos analisados, os resultados são relativamente próximos.

No geral, o balanço hídrico das bacias é favorável, com uma oferta hídrica que, em todos os pontos, supera a demanda atual, indicando um cenário positivo para a gestão de novos usuários. No entanto, é importante ressaltar que, mesmo com uma disponibilidade hídrica aparentemente favorável, as bacias analisadas podem não estar isentas de pontos críticos.

Na BRPB o balanço hídrico é mais favorável nos Pontos F, G e H, onde as vazões outorgáveis são significativamente superiores às demandas de captação, encontrando a disponibilidade de 92,16%, 52,99% e 84,91% respectivamente. Mas nos Pontos D e E o valor potencial passível de aproveitamento hídrico é reduzido, sendo 33,65% e 23,02% respectivamente. Tendo em vista que o Ponto D está a jusante de uma importante captação para abastecimento para o Município de Juiz de Fora e a área do Ponto E está sujeita a inúmeras intervenções antrópicas por abranger a cidade de Juiz de Fora. Tais resultados foram obtidos assumindo uma situação crítica, com o máximo de captação e o mínimo de lançamentos, mas ainda existem captações irregulares que podem impactar significativamente a disponibilidade hídrica local, e, por isso, uma abordagem mais restritiva pode garantir a oferta hídrica de uso dos usuários nesses pontos.

Um ponto que necessita de atenção nesta bacia é a quantidade de outorgas de lançamento, dentre as 540 interferências contabilizadas há somente 9 interferências de lançamento sendo somente uma de domínio estadual, o que indica a indisponibilidade de dados de outorga de lançamento ou até mesmo a ausência dessas outorgas, o que pode impactar significativamente os resultados do balanço hídrico.

Uma limitação relevante deste estudo é a ausência de estações fluviométricas com séries temporais mais recentes, já que muitas foram desativadas. Algumas não operam há mais de quatro anos, o que dificulta uma avaliação precisa das condições hídricas atuais, sem considerar os efeitos de eventos climáticos recentes. Os métodos de aproximação de vazões, embora úteis, não refletem a realidade local de forma precisa, fornecendo estimativas que podem divergir das vazões reais. Soma-se a isso as próprias limitações dos métodos hidrológicos, que analisam o comportamento da vazão ao longo do tempo sem considerar detalhes do escoamento no canal, diferentemente dos métodos hidráulicos, que levam em conta características físicas, como geometria, rugosidade e leis do escoamento.

Além disso, a disponibilidade hídrica efetiva envolve mais que a simples quantificação da água, exigindo a análise da qualidade e a classificação dos usos, conforme a legislação ambiental brasileira, visto que corpos d'água poluídos têm sua disponibilidade reduzida para usos mais restritivos. Diante disso, recomenda-se a utilização de diferentes métodos hidrológicos para uma análise mais robusta, além da expansão da rede de monitoramento hidrológico, com a reativação e instalação de novos postos, de forma a capturar melhor os efeitos das mudanças climáticas na bacia. Também é essencial fortalecer as políticas de atualização das bases de dados de outorgas, com ênfase nas outorgas de captação, que impactam diretamente o balanço hídrico — no âmbito da redução da disponibilidade do recurso hídrico —, e integrar as análises

de quantidade e qualidade da água. Essas medidas são fundamentais para garantir uma gestão hídrica mais eficiente, sustentável e alinhada com a realidade da bacia.

REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*, 2019.
- BRASIL. Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997. *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e dá outras providências*.
- COLLISCHONN, W. et al, (2005). *Em busca do hidrograma ecológico*. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. (16.: 2005 nov. 20-24: João Pessoa, PB). Anais. [João Pessoa]: ABRH, 2005.
- Collischonn, W. et al, (2006). *Da vazão ecológica ao hidrograma ecológico*. In: Congresso da Água, 8, Figueira da Foz. Anais... Lisboa: APRH. CD-Rom.
- CRUZ. R. C. *Prescrição de vazão ecológica: aspectos conceituais e técnicos para bacias com carência de dados*. 2005. 135f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- GUEDES, Hugo Alexandre Soares. *Modelagem hidrodinâmica do ecossistema aquático visando a determinação do hidrograma ecológico no Rio Formoso-MG*. 2013. 185 f. Tese (Doutorado em Construções rurais e ambiência; Energia na agricultura; Mecanização agrícola; Processamento de produto) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- MINAS GERAIS. *Decreto n° 47.705, de 4 de setembro de 2019. Estabelece normas e procedimentos para a regularização de uso de recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais*.
- MIRANDA, A. et al. (2023). *Avaliação da disponibilidade hídrica na bacia do rio Piabanha por meio de métodos hidrológicos utilizados nos Estados do Rio de Janeiro, de Minas Gerais e de São Paulo*. XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. (25: 2023 nov. 19-24: Aracaju, SE). ABRH, 2023.
- PINTO, V. G. et. al, 2016. *Vazão ecológica e o arcabouço legal brasileiro*. REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA FÍSICA V. 09 N. 01 (2016) 091-109.
- PROFILL - *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Preto e Paraibuna*. (2021).
- QUIST M.C., SCHULTZ R.D., 2014. *Effects of management legacies on stream fish and aquatic benthic macroinvertebrate assemblages*. ENVIRONMENTAL MANAGEMENT 54, 449 – 464.
- SOUZA C.F., 2009. *Vazões ambientais em hidrelétricas: Belo Monte e Manso*. Tese (Doutorado). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VESTENA, L. R. et al. *Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras, Guarapuava-PR*. AMBI-ÁGUA, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 212-227, 2012.