

DOI: <https://doi.org/10.59824/rmrh.v6.360>

METODOLOGIAS HIDROLÓGICAS PARA DIMENSIONAMENTO DE VAZÃO RESIDUAL DE BARRAGENS, EM RIOS INTERMITENTES, EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS NO SEMIÁRIDO MINEIRO

Hydrological methodologies for residual flow estimation of dams in intermittent rivers within small watersheds in the semi-arid region of Minas Gerais

Rafael Alexandre Sá¹

Heitor Soares Moreira²

Edson de Oliveira Vieira³

Wesley Mota França⁴

RESUMO

A gestão pública dos recursos hídricos busca estabelecer um equilíbrio adequado entre a utilização da água e a preservação das suas funções ecossistêmicas. No contexto do semiárido mineiro, uma região caracterizada pela escassez hídrica, torna-se imperativo adotar metodologias de gestão que considerem as particularidades hidrológicas, como a intermitência dos mananciais superficiais. Em Minas Gerais, a utilização da vazão de referência $Q_{7,10}$ é estabelecida como parâmetro para todo o território estadual. No entanto, tal abordagem tem se

¹ Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido pela Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES). Graduado em Engenharia Agronômica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais pela UFMG. Analista Ambiental do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) – e-mail: rafael.sa@meioambiente.mg.gov.br

² Mestrado em Tecnologias e Inovações Ambientais pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Analista Ambiental pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) – e-mail: heitor.moreira@meioambiente.mg.gov.br * Autor correspondente

³ Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Pós-Doutorado no Department of Land, Air and Water Resources da UC Davis, Califórnia, USA em Gestão de Bacias Hidrográficas com uso de modelos hidrológicos. Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Graduação em Agronomia pela UFV. Professor Titular da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Coordenador do Laboratório de Hidráulica do ICA/UFMG – e-mail: eovieira@ica.ufmg.br

⁴ Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido pela Universidade Estadual de Montes Claros. Graduado em Agronomia pela Universidade Estadual de Montes Claros. Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade Pitágoras de Belo Horizonte e Auditoria, Perícia e Licenciamento Ambiental pelo Centro Universitário Única. Analista Ambiental do Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM na Unidade Regional de Gestão das Águas Norte de Minas - URGA NM. – e-mail: wesley.mota@meioambiente.mg.gov.br

mostrado, em algumas situações, inadequada para mananciais intermitentes, que apresentam características distintas. Nesse sentido, foi realizada a avaliação de três diferentes metodologias para o dimensionamento da disponibilidade hídrica em cenários de barragens em cursos de água intermitentes, com base nas metodologias de Tennant ou Montana, Q_{90} e Q_{95} . Os resultados, obtidos a partir da aplicação dessas metodologias em dois estudos decaso, evidenciaram que a curva de permanência Q_{95} é a mais adequada para representar o comportamento hidrológico das estruturas hídricas no semiárido mineiro, refletindo de forma mais precisa as especificidades dessa região.

Palavras-chave: Barragens; Semiárido; Intermitência; Hidrologia; Estatística.

ABSTRACT

Public management of water resources aims to balance water use with the preservation of ecosystem functions. In the semi-arid region of Minas Gerais, Brazil — characterized by recurrent water scarcity — adopting management approaches that account for hydrological specificities, such as the intermittency of surface water bodies, is essential. Currently, the reference flow rate $Q_{7.10}$ is applied uniformly throughout the state. However, this criterion has proven inadequate in certain cases involving intermittent watercourses, which exhibit distinct hydrological behavior. This study evaluated three methodologies for estimating water availability in scenarios involving dams on intermittent rivers: the Tennant (or Montana) method, Q_{90} , and Q_{95} . The application of these methods to two case studies revealed that the Q_{95} flow duration curve provides the best representation of hydrological dynamics in the semi-arid region of Minas Gerais, more accurately reflecting the region's specific characteristics.

Keywords: Dams; Semiarid; Intermittency; Hydrology; Statistics

Data de submissão: 19/05/2025

Data de aprovação: 11/06/2025

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade na gestão dos recursos hídricos exige que a utilização da água seja realizada de maneira que sua disponibilidade e qualidade possam ser mantidas e aprimoradas ao longo do tempo. Nesse contexto, as infraestruturas hídricas, como as barragens construídas no semiárido mineiro, desempenham um papel crucial ao ampliar a

oferta de água na região, destinando-se ao abastecimento público, à geração de energia, aos parques industriais e à agropecuária, atividade econômica de destaque.

No semiárido mineiro, estimam-se índices de precipitação na ordem de 800 mm.ano⁻¹ e chuvas concentradas em quatro meses do ano, o que caracteriza longos períodos sem chuva (estiagem). Esse cenário revela-se propício para investimentos em infraestrutura hídrica, como reservatórios de água, visando atender as demandas para consumo humano e fins econômicos, tais como: irrigação, dessedentação animal e uso industrial.

A gestão dos recursos hídricos em Minas Gerais, dada a sua heterogeneidade hidrológica e climática, requer uma abordagem descentralizada. Isso implica não apenas em uma divisão eficiente entre os entes gestores de bacias, mas também na utilização de metodologias específicas na aplicação dos instrumentos de gestão, que assim, serão capazes de reconhecer e tratar os múltiplos biossistemas hidrológicos que compõem o território.

A aderência do método de gestão ao comportamento hidrológico específico do semiárido mineiro fundamenta-se na calibração adequada entre as propostas de gestão das barragens e o comportamento real dessas estruturas. Essa calibração é essencial para garantir que as intervenções e estratégias adotadas para o gerenciamento hídrico estejam alinhadas com as características particulares da região, promovendo, assim, uma gestão mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos.

Embora a literatura técnica nacional aborde amplamente critérios como a vazão $Q_{7,10}$, regionalizada na base anual, para fins de outorga, observa-se uma lacuna significativa quanto à aplicabilidade dessa metodologia em cursos d'água intermitentes, especialmente em pequenas bacias do semiárido. Este estudo contribui para preencher essa lacuna ao comparar diferentes abordagens hidrológicas, Q_{90} , Q_{95} e Tennant, em contextos de escassez hídrica e períodos marcantes de seca e chuva. O presente trabalho propõe uma reflexão crítica sobre a adequação dos critérios normativos vigentes em Minas Gerais, sugerindo alternativas metodológicas mais compatíveis com a realidade hidrológica do semiárido mineiro. Trata-se, portanto, de uma contribuição original à gestão de recursos hídricos em regiões com características hidroclimáticas específicas e carência de séries históricas robustas.

Diante do exposto, objetiva-se avaliar três metodologias hidrológicas para dimensionamento de vazão residual em dois barramentos de regularização de vazão para curso d'água intermitente, que possam ser aplicadas na avaliação da disponibilidade hídrica e potencial de regularização de vazão em estruturas de barragens construídas em cursos de água

intermitentes no estado de Minas Gerais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A água é um bem natural de grande valor para a manutenção dos processos ecossistêmicos. Dentre as funções destacam-se a manutenção da saúde pública, o desenvolvimento econômico e o equilíbrio ecológico. A gestão pública da água propõe um adequado equilíbrio entre a utilização e a manutenção da estrutura ecossistêmica, visando sua manutenção contínua para a presente e futura geração.

Em região de clima semiárido, marcada pelos índices pluviométricos em torno de 800 mm.ano⁻¹ e uma evaporação potencial de 2.000 a 2.500 mm.ano⁻¹, verifica-se um balanço hídrico negativo, fato que reduz a disponibilidade hídrica natural, criando o cenário de escassez hídrica (Oliveira, *et al.*, 2015).

A sazonalidade da disponibilidade hídrica superficial é uma condição natural dessa região, que pode ser agravado por ações humanas e mudanças climáticas.

No semiárido, a variação temporal das vazões fluviais é resultado da ocorrência de períodos secos e úmidos durante o ano. Ao longo do tempo, considerando o aumento da demanda, verificou-se a necessidade da formação de reservas hídricas durante o período úmido para serem utilizadas nas demandas diversas na estação seca.

Diante dessa baixa disponibilidade de recursos hídricos superficiais, característico das regiões semiáridas, e em contraponto com a necessidade de desenvolvimento socioeconômico desses territórios, desde a década de 80 foram construídas diversas barragens de água para fins hidroelétricos, hidroagrícolas e abastecimento público. As condições de intermitência desses cursos de água demonstraram que esses reservatórios são essenciais para a promoção da segurança hídrica na região semiárida (Moura, *et al.*, 2020).

A Política Nacional de Segurança de Barragem definiu o termo barragem como:

(...) qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (Brasil, 2020).

As barragens de regularização de vazão, objeto desse estudo, têm por finalidade criar um reservatório de água capaz de evitar as grandes variações de vazões no curso de água a jusante, controlar situações de inundações em épocas de chuvas intensas, viabilizar a manutenção de sistemas agrícolas, geração de energia, abastecimento público, proporcionando acumulação de grandes volumes para captação e manutenção de fluxos de água a jusante do seu eixo (Barbosa Júnior, 2024).

O potencial operacional de um reservatório pode ser avaliado a partir do comportamento de sua curva de balanço hídrico, que reflete a evolução do volume armazenado ao longo do tempo, em função das suas condições operacionais. De maneira geral, as entradas de água no reservatório podem ser representadas pelo escoamento superficial proveniente dos eventos de precipitação e pelo escoamento de base, este último sendo relativamente insignificante em regiões semiáridas. As saídas do balanço hídrico, por sua vez, podem ser sintetizadas pelos processos de captação de água, evaporação e vazão residual (Lopes, Santos, 2002). Essa abordagem quantitativa é essencial para compreender a dinâmica de armazenamento, utilização da água nos reservatórios e usuários de jusante, permitindo uma visão holística da bacia hidrográfica e a gestão mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos disponíveis.

A intermitência de um curso d'água é definida quando há a interrupção do fluxo em algum trecho no tempo e no espaço, seja por causas naturais ou resultantes de ações antropogênicas.

As bacias de drenagem nessas condições apresentam características de redes dendríticas que, na maior parte do ano, formam um conjunto de cursos secos de areia, cascalho, seixos e rochas com sequências ocasionais de poças efêmeras e temporárias espalhadas ao longo do curso do leito seco (Teixeira, 2023).

Por alterar o regime hídrico de um curso d'água, as barragens, via de regra, devem se submeter ao processo de regularização junto ao órgão gestor de recursos hídricos do Estado. Uma das modalidades de regularização é a outorga de direito de uso das águas. Durante a avaliação do processo de outorga são consideradas as vazões mínimas defluentes, ou seja, a descarga garantida à jusante da barragem para manutenção da vida aquática e de outros usos na bacia.

Entretanto, as características de um curso hídrico intermitente inviabilizam, em muitos casos, que os barramentos de pequeno porte possam defluir uma vazão residual dimensionada a partir de estatística hidrológica, que se adequa a um cenário de perenidade de fluxo de água. Apesar disso, em Minas Gerais, os barramentos em rios intermitentes, atualmente, se submetem aos mesmos regramentos de uma barragem em cursos hídricos perenes.

A baixa densidade de dados de séries históricas de precipitação e vazão é um ponto crítico na aplicação de métodos de regionalização e modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, especialmente em pequenas bacias hidrográficas. Essa limitação compromete a análise e a confiabilidade dos resultados simulados, tornando essencial uma avaliação criteriosa das metodologias e a busca por alternativas que minimizem os impactos dessa lacuna nas análises de outorga do direito de uso das águas.

A bacia hidrográfica pode ser classificada quanto ao porte em função da sua área de drenagem. Embora não exista um critério único, encontra-se na literatura algumas definições para essa classificação, a saber:

Segundo Tucci (2002), uma bacia hidrográfica pequena é aquela com área de drenagem inferior a 100 km², caracterizada por resposta hidrológica rápida, escoamento superficial concentrado e tempo de concentração curto, o que a torna sensível a eventos extremos como enchentes e secas.

De acordo com Bedient *et al.* (2013), bacias pequenas geralmente apresentam áreas inferiores a 50 km², sendo dominadas por escoamento superficial direto, com pouca influência de processos de base como infiltração ou recarga subterrânea. Essas bacias são particularmente comuns em regiões semiáridas, onde o escoamento superficial predomina e a variabilidade interanual da vazão é acentuada (Tucci, 2002; Molle, Wester, 2009).

Uma bacia hidrográfica pequena caracteriza-se pela predominância do escoamento superficial não canalizado no pico de descarga, em comparação com o escoamento superficial canalizado. Em tais bacias, o fluxo de água resultante da precipitação atinge os pontos de coleta de forma mais direta e imediata, evidenciando uma resposta hidrológica rápida e sazonal. Essa característica ressalta a influência dos processos de infiltração e das condições locais de superfície, que limitam a formação e a eficácia dos canais de escoamento, distinguindo o comportamento hidrológico de bacias de menor escala.

Experiências internacionais demonstram que a gestão de recursos hídricos em bacias intermitentes exige abordagens adaptadas à variabilidade climática e à escassez hídrica. Na bacia do Murray-Darling, na Austrália, práticas de alocação ambiental de água foram desenvolvidas com base em curvas de permanência e regras sazonais, visando preservar os ecossistemas aquáticos mesmo durante períodos de seca severa (Murray-Darling Basin Authority - MDBA, 2012). De forma semelhante, na bacia do rio Limpopo, na África do Sul, a intermitência dos cursos d'água levou à adoção de instrumentos como o *Ecological Reserve*, que define vazões mínimas com base em critérios ecológicos e sociais (Department of Water Affairs and Forestry - DWAF, 2004). Já na bacia do rio Guadalquivir, na Espanha, as políticas de gestão integrada consideram tanto a sazonalidade hídrica quanto a segurança hídrica dos usuários, utilizando séries históricas e modelagem hidrológica para definir vazões ecológicas em sistemas temporários (Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 2018).

Esses exemplos internacionais reforçam a necessidade de adoção de metodologias diferenciadas para contextos semiáridos, com base em critérios locais e dados históricos que refletem a realidade hidrológica das bacias intermitentes, tal como proposto neste estudo para o semiárido mineiro.

Outro ponto é que mesmo na situação de intermitência, como na região semiárida, o estado de Minas Gerais, utiliza a vazão de referência $Q_{7,10}$ como parâmetro para o dimensionamento da vazão residual mínima a jusante de barramentos, sendo essa metodologia mais adequada em situação de perenidade.

Em períodos de estiagem, é comum que a vazão afluente aos reservatórios seja inferior à vazão de defluência estipulada no processo de outorga do direito de uso dos recursos hídricos. Essa condição pode levar a um rebaixamento significativo do nível do reservatório, atingindo a cota mínima operacional e, consequentemente, elevando o risco de ruptura. Em regiões onde a vazão de referência $Q_{7,10}$ se aproxima de zero, a exigência de defluência mínima torna-se ainda mais crítica, podendo provocar um efeito cascata em reservatórios a jusante, que deixariam de receber aportes hídricos mesmo durante o período chuvoso.

A adoção de vazões de referência mais compatíveis com as condições hidrológicas do semiárido, ou o uso de estudos de regionalização de vazões com base em séries sazonais, mostra-se mais adequada à realidade regional e à segurança hídrica dos sistemas (Moura *et al.*, 2017; Montenegro, 2012).

Uma revisão global do estado atual das metodologias de vazão ambiental revelou a existência de cerca de 207 metodologias individuais, registradas para 44 países em seis regiões do mundo (Tharme, 2003). Para Acreman e Dunbar (2004) em seu trabalho de definição requisitos de vazão ambiental de rios, alegam que nenhum método é necessariamente melhor que outro; cada um pode ser adequado para diferentes aplicações.

A Portaria nº 48/2019 do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) em seu artigo 3º, combinado com o artigo 7º, estabelece:

Art. 3º – O limite máximo de captações de recursos hídricos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais, para cada seção considerada em condições naturais, será de 50% (cinquenta por cento) da $Q_{7,10}$, ficando garantidos, a jusante de cada intervenção, fluxos residuais mínimos equivalentes a 50% (cinquenta por cento) da $Q_{7,10}$.

Art. 7º – No caso de barramentos com regularização de vazões, a vazão outorgada poderá exceder o limite máximo estabelecido no artigo 3º, aproveitando-se o potencial de regularização, desde que seja mantido o fluxo residual mínimo a jusante. (IGAM, 2019)

Esses dispositivos legais, embora estabeleçam um parâmetro para a gestão das águas, revelam-se inadequados para contextos de intermitência, uma vez que a vazão $Q_{7,10}$, calculada na base anual, em rios intermitentes é zero ou próxima de zero.

A aplicação uniforme dessa metodologia de análise de outorga de barragem com capacidade de regularização de vazão, não reflete a real disponibilidade hídrica, comprometendo a eficácia da gestão e a sustentabilidade dos sistemas hídricos em regiões de grande variabilidade climática e hidrológica. Nos casos de cursos hídricos com características de intermitência, ao utilizar a vazão de referência $Q_{7,10}$, o percentual de liberação a jusante seria igual ou muito próximo a zero.

No contexto da intermitência dos cursos d'água do semiárido, o conceito de vazão residual de regularização deve referir-se à sazonalidade das ocorrências hídricas fluviais naturais na bacia. Em outras palavras, nos meses úmidos uma defluência maior e nos meses de estiagem, uma defluência proporcional a afluência no reservatório da barragem.

Assim, faz-se necessário adequar o marco regulatório para o estado de Minas Gerais, considerando as características hidrológicas da bacia hidrográfica, porte da barragem, a finalidade da obra e do uso do recurso hídrico, que se adere à realidade das regiões com intermitência de vazão.

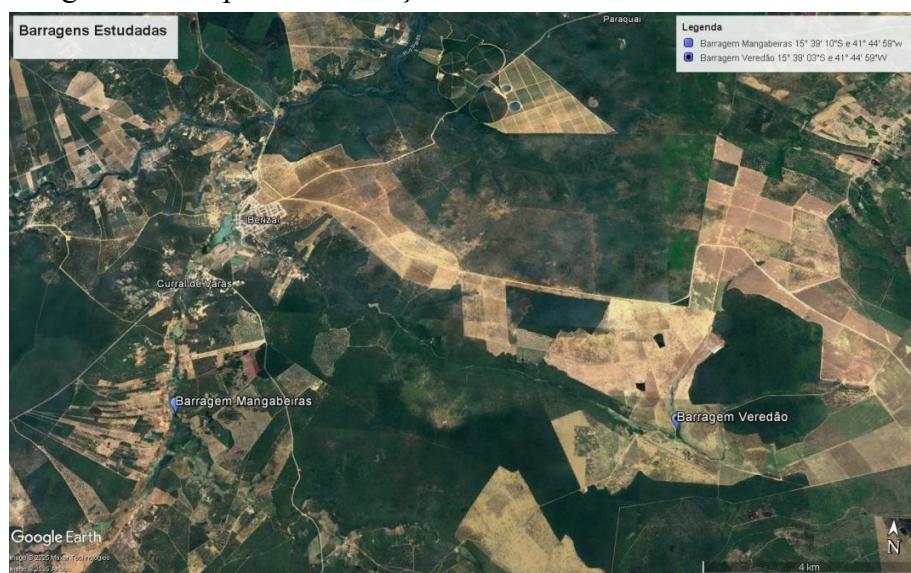
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição da Área de Estudo

O presente estudo de caso consiste na avaliação de dois barramentos destinados a fins agropecuários, localizados na região Norte de Minas Gerais, especificamente no alto da bacia do rio Pardo, na microregião de Salinas, no município de Berizal-MG.

Os barramentos foram selecionados considerando as características climáticas da região e por possuir um porte que se assemelha a grande parte dos barramentos construídos no semiárido. De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima tipo *As* (tropical de savana com estação seca), com precipitação média anual de aproximadamente 852 mm. A Imagem 1 demonstra a localização das estruturas das barragens objeto de estudo.

Imagem 1 – Mapa de localização das estruturas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O primeiro empreendimento agropecuário avaliado conta com um barramento localizado no Córrego Veredão, que abastece um projeto de irrigação para 8 hectares (ha) de pastagens e forrageiras, utilizando aspersão convencional. Além disso, o reservatório é empregado para a dessedentação de cerca de 3.000 bovinos. O barramento foi construído com

solo compactado, apresentando as características descritas (QUADRO 1).

Quadro 1 – Características do reservatório no Córrego Veredão

Item	Descrição
Área Inundada (ha)	5,73
Volume Acumulação (m ³)	132.000
Área de Drenagem (km ²)	30
Vazão (q ₇₁₀)	0,0
Vazão Requerida (l.s ⁻¹)	5

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O projeto de captação do empreendimento 1 contempla o manejo (QUADRO 2).

Quadro 2 – Valores de captação para atendimento do empreendimento 1

Mês	Vazão Requerida (l/s)	Horas/Dia	Dias/Mês	Volume(m ³)
Jan	5	9	31	5022
Fev	5	9	28	4536
Mar	5	16	31	8928
Abr	5	16	30	8640
Mai	5	16	31	8928
Jun	5	16	30	8640
Jul	5	16	31	8928
Ago	5	16	31	8928
Set	5	16	30	8640
Out	5	16	31	8928
Nov	5	16	30	8640
Dez	5	9	31	5022

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O segundo empreendimento agropecuário possui um barramento no Córrego Mangabeira, onde utiliza esse reservatório para abastecimento de um projeto de irrigação de 10 hectares (ha) de culturas perenes e anuais, por meio de gotejamento, e dessedentação de cerca de 200 bovinos. O barramento foi construído com solo compactado e detém as características apresentadas (QUADRO 3).

Quadro 3 – Características do reservatório no Córrego Mangabeira

Área Inundada (ha)	34
Volume Acumulação (m ³)	476.072,80
Áreade Drenagem (km ²)	313,5
Vazão (q _{7,10})	0,0
Vazão Requerida (l.s ⁻¹)	10

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O projeto de captação do empreendimento 2 contempla o manejo (QUADRO 4).

Quadro 4 – Valores de captação para atendimento do empreendimento 2

	Vazão Requerida (l/s)	Horas/Dia	Dias/Mês	Volume(m ³)
Jan	10	16	31	17856
Fev	10	16	28	16128
Mar	10	16	31	17856
Abr	10	16	30	17280
Mai	10	16	31	17856
Jun	10	16	30	17280
Jul	10	16	31	17856
Ago	10	16	31	17856
Set	10	16	30	17280
Out	10	16	31	17856
Nov	10	16	30	17280
Dez	10	16	31	17856

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Tanto o Córrego Veredão como o Mangabeira são cursos de água intermitentes, com vazão de referência Q_{7,10} igual ou muito próxima a zero, verificado por meio do Estudo de Regionalização de Vazão para o Aprimoramento do Processo de Outorga no estado de Minas Gerais (IGAM; UFV, 2012). Ressalta-se que o estudo foi realizado na base anual e não sazonal.

3.2 Metodologias Testadas

O estudo de um reservatório, seja este com ou sem capacidade de regularização de vazões, requer um conhecimento aprofundado sobre suas dimensões, as vazões afluentes, a demanda a ser suprida, bem como as perdas associadas a processos de infiltração e evaporação. Além disso, a capacidade de armazenamento da estrutura deve ser capaz deliberar uma vazão residual que atenda, de forma mínima, às funções ecossistêmicas essenciais, como a dinâmica ambiental e fluvial, o controle dos níveis de salinidade e/ou os processos de renovação das várzeas a jusante da estrutura (Cunha, 2015; Santos *et al.*, 2020).

Para ajustar o dimensionamento da vazão residual a jusante de barramentos localizados em cursos d’água intermitentes no estado de Minas Gerais, foram avaliadas três metodologias hidrológicas, considerando as características hidrológicas e climáticas específicas da região semiárida, visando uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos.

As metodologias aqui testadas são metodologias adotadas por órgãos gestores de recursos hídricos internacionais ou de outros estados brasileiros, em cursos hídricos intermitentes, na análise de outorga de barramentos.

Considerou-se, ainda, que as metodologias testadas são baseadas em informações disponíveis em estudos publicados, o que viabiliza sua adoção imediata pelo órgão gestor.

Essa viabilidade decorre do fato de que tais metodologias já são reconhecidas por órgãos gestores em diferentes contextos nacionais e internacionais, com procedimentos de cálculo baseados em dados disponíveis nas séries históricas fluviométricas públicas, como os da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o que facilita sua replicabilidade técnica e institucional sem a necessidade de modelos hidrodinâmicos complexos. Por exemplo, o Método de Tennant é amplamente utilizado nos Estados Unidos desde a década de 1970, sendo adotado por agências como o *U.S. Fish and Wildlife Service* e o *Montana Department of Fish, Wildlife and Parks* (Tennant, 1976). Já o uso de vazões de permanência como Q_{90} e Q_{95} como critério de vazão ecológica ou mínima residual é empregado por instituições como a Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2018) e a *Environment Agency* do Reino Unido (2014), refletindo práticas consolidadas na gestão de recursos hídricos em contextos de escassez hídrica.

Essas três metodologias foram aplicadas como vazão residual para os barramentos em estudo com o objetivo de avaliar os níveis de restrição de cada uma. Os dados fluviométricos foram extraídos da Estação - Fazenda Benfica - Código 53490000, Rio Pardo - Indaiabira-MG.

Para a análise estatística dos dados da Estação, foi utilizado o *software* SISCAH. O período base considerado foi de 1970 a 2005 com o ano crítico determinado em 1994. Utilizando os dados de vazões do ano crítico, determinou-se os valores de vazão média mensal das metodologias Tenant, Q₉₀ e Q₉₅ para a Estação Fluviométrica e, regionalizando essas vazões para as respectivas áreas de contribuição dos barramentos, colocando apenas as áreas de drenagem como variável hidrológica, obteve-se os valores apresentados (QUADRO 5).

Quadro 5 – Valores de variáveis hidrológicas para as barragens do estudo aplicando as metodologias propostas

Estatística Hidrológica – Barragem Veredão	Média mensal de vazão (m ³ .s ⁻¹)		
30 e 10% Método Tenant	0,029	0,0098	\bar{x} 0,0194
100% Q ₉₀	0,0071		
100% Q ₉₅	0,0031		
Estatística Hidrológica – Barragem Mangabeira	Média mensal de vazão (m ³ .s ⁻¹)		
30 e 10% Método Tenant	0,304	0,102	\bar{x} 0,203
100% Q ₉₀	0,0487		
100% Q ₉₅	0,0213		

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

3.2.1 Método de Tenant

O método, Tenant (ou Montana), foi desenvolvido a partir de observações sobre habitats e vazões feitas durante 10 anos nos estados americanos de Montana, Nebraska e Wyoming. Esse método determinou como vazão residual 30% da vazão média anual para o período chuvoso (outubro - março) e 10% para o período seco (abril - setembro) (Longhi; Formiga, 2011).

3.2.2 Método baseado na vazão 90% da curva de permanência

O segundo refere-se ao método da vazão residual, baseado na vazão Q_{90} , esse método considera como vazão residual o valor correspondente da vazão igualada ou excedida durante 90% do tempo em uma bacia. Nos estados da Bahia e do Tocantins, para barramentos em rios intermitentes utiliza-se a vazão de referência Q_{90} , como vazão residual mínima (Benetti; Lanna; Cobalchini, 200; Tocantins, 2005).

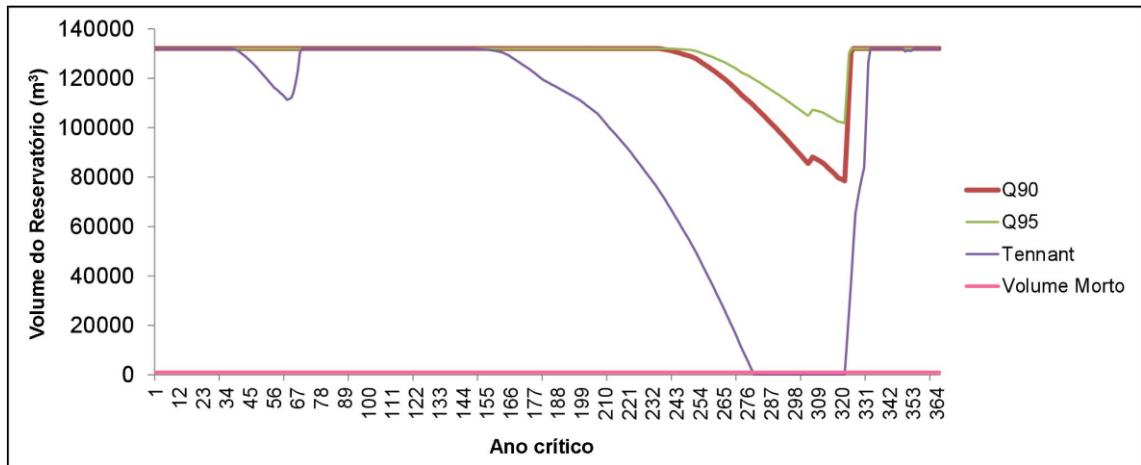
3.2.3 Método baseado na vazão 95% da curva de permanência

O terceiro método a ser avaliado é o método Q_{95} , sendo esta vazão muito utilizada como vazão de projeto de empreendimentos hidrelétricos. O estado de Goiás e a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) utilizam essa vazão de referência para dimensionar a vazão residual em barramentos. (SEMARH, 2012; ANA, 2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

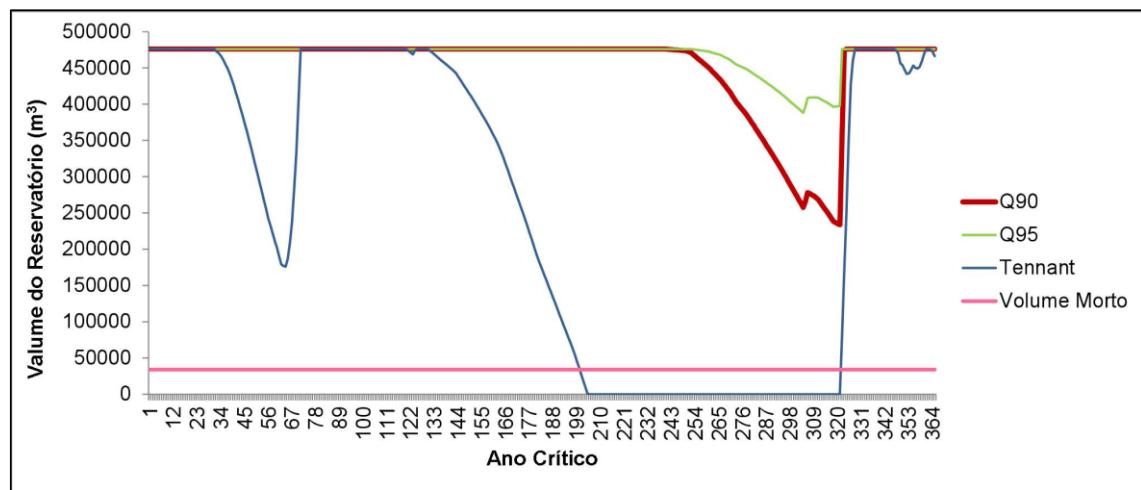
Para avaliar a aderência dos métodos testados na gestão das barragens foi aplicada a vazão de referência encontrada como vazão residual dos respectivos barramentos em estudo, conforme Gráficos 1 e 2, em uma simulação de esvaziamento utilizando a planilha de conservação de água utilizada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), obteve-se os resultados.

Gráfico 1– Comportamento do reservatório - Córrego Veredão



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Gráfico 2 – Comportamento do reservatório-Córrego Mangabeira



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A metodologia Tennant, aplicada como vazão de referência residual para rios intermitentes, mostrou-se inviável para operação dos reservatórios em análise. Com o valor residual encontrado o reservatório atingiria o volume morto no período de estiagem, considerando o ano crítico da série histórica aplicada à simulação. Essa incompatibilidade pode ser explicada pela diferença morfológica das bacias utilizadas para elaboração do método e a bacia hidrográfica em estudo. Essa metodologia foi desenvolvida para grandes rios (50 m de largura ou mais), que exibem pouca variação de vazão ao longo do ano (Sarmento, 2007).

O fato de se tratar de afluentes pequenos na bacia do rio Pardo e com características de intermitência, ou seja, grande variação da vazão durante o ano, explica a incompatibilidade do método para dimensionar uma vazão residual que viabiliza a operação. Mesmo tendo passado por inúmeras modificações, de modo a obter uma melhor adaptação no regime de vazões ecológicas em regiões diferentes daquela para a qual o método foi desenvolvido, esse método não apresentou resultado satisfatório.

A metodologia da curva de permanência para a característica do curso d'água e a área de drenagem estudada, apresentou-se viável, tanto no percentual Q_{90} , como no Q_{95} , para ambos reservatórios.

A vazão Q_{95} para atendimento da simulação de esvaziamento atende adequadamente a operação do reservatório sem imposição de restrição do uso da captação. Trata-se da metodologia adotada pelo estado de Goiás e pela ANA que se apresentou adequada aos barramentos estudados. A vazão de referência Q_{90} apresentou-se, da mesma forma, viável no sistema de operação dos barramentos. Trata-se de uma metodologia aplicada nos estados da Bahia e do Tocantins para dimensionamento de vazão residual a jusante de barramento de rios intermitentes.

As vazões de referência Q_{90} e Q_{95} representam as curvas de referências mais usuais para determinação de vazões mínimas residuais e/ou ecológicas para fins de critério de outorga em regiões semiáridas, sendo que o limite mínimo da vazão de referência Q_{95} amplia a gama de reservatórios em rios intermitentes, que podem ser regularizados a partir do limite dessa metodologia.

5 CONCLUSÃO

Com base na aplicação das metodologias de dimensionamento da vazão residual em rios intermitentes no semiárido mineiro, observou-se que, para pequenas bacias hidrográficas, a metodologia da vazão Q_{95} mostrou-se mais adequada para a gestão dos recursos hídricos no estado de Minas Gerais. A metodologia Tennant, por sua vez, resultou em uma defluência residual inviável, com falhas recorrentes na operação dos barramentos nos cursos de água intermitentes.

A aplicação da metodologia que utiliza a vazão residual Q_{90} , adotada nos estados do Tocantins e da Bahia, demonstrou viabilidade para a gestão dos recursos hídricos, mas apresentou um valor 56% superior ao da metodologia Q_{95} , o que a torna mais restritiva em relação à adequação das barragens em cenários semelhantes aos estudados neste artigo.

Outro aspecto relevante diz respeito às características intrínsecas dos ambientes fluviais intermitentes. Mesmo a jusante de um reservatório é essencial que se mantenha uma defluência programada desse fluxo, de modo a refletir as ocorrências hídricas típicas da intermitência. A utilização da vazão estatística Q_{95} como vazão de referência já contempla a possibilidade de falha de 5% na permanência do fluxo residual anual, o que é apropriado para os contextos estudados.

Como implicação prática, a adoção da vazão de referência Q_{95} pode subsidiar uma revisão normativa do critério $Q_{7,10}$ no semiárido mineiro, possibilitando maior regularização hídrica e dirimindo conflitos. Contudo, ressalta-se que a limitação de dados hidrológicos em pequenas bacias ainda impõe desafios. Estudos futuros devem considerar o monitoramento contínuo de vazões, estudos de regionalização de vazões sazonais, bem como o uso de modelagens acopladas à variabilidade climática para aprimorar a definição de vazões ecológicas em ambientes intermitentes.

Nesse cenário de intermitência, é fundamental que se reforce a dinâmica de ocorrência hídrica fluvial, especialmente durante o período chuvoso, e se necessário a interrupção do fluxo residual no período de estiagem. Essa dinâmica de pulso de vazão, em princípio, pode ser benéfica para a persistência ecossistêmica do semiárido, uma vez que está adaptada à sazonalidade das ocorrências hídricas fluviais características dessa região. Portanto, a metodologia Q_{95} , ao refletir melhor essas condições, emerge como uma ferramenta crucial para a gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos em áreas de hidrologia intermitente no semiárido mineiro.

Ademais, os resultados oferecem subsídios técnicos para a atualização de critérios normativos em políticas públicas estaduais de outorga, promovendo maior eficiência na gestão hídrica em contexto do semiárido, coerentemente à diretriz da Política Nacional de Recursos Hídricos que estabelece que a bacia hidrográfica é a unidade de gestão e deve ser considerada a interdependência entre os elementos da natureza e as atividades humanas nessa área.

Por fim, impõe destaque que as estruturas de barragens em pequenas bacias hidrográficas configuram-se como uma alternativa de segurança hídrica para convivência com o semiárido, pois apresentam potencial de mitigar a amplitude da sazonalidade da disponibilidade de água em rios intermitentes. Porém, o fator locacional, assim como a densidade de barragens em uma mesma bacia hidrográfica, pode ocasionar efeitos rebotes no aumento da disponibilidade hídrica, transformando a seca hidroclimática, em uma seca hidrológica a jusante dessas estruturas (Colombo, *et al.*, 2024).

Na gestão dos recursos hídricos, a avaliação dos impactos pontuais das estruturas de barragens é importante para análise dos fatores locacionais e hidrológicos na bacia em estudo. No entanto a análise da densidade de barragens em uma bacia deve ser considerada no contexto da seca hidrológica (período de enchimento dessas barragens no início do período chuvoso), que pode aumentar o período de seca no semiárido em um percentual de até 30%, conforme estudos realizados por Ribeiro Neto, *et al.* (2021) na região nordeste brasileira. A complexidade da gestão de pequenas barragens em rios intermitentes pode ser amenizada a partir da instalação de mais estações fluviométricas gerando dados confiáveis e o monitoramento do comportamento hidráulico das barragens instaladas no semiárido mineiro.

As conclusões obtidas têm aplicação prática direta na revisão dos marcos regulatórios de outorga em rios intermitentes. A adoção da vazão Q_{95} pode ampliar o número de barramentos regularizáveis e garantir maior segurança hídrica com conservação ecossistêmica. Como limitação destaca-se a dependência de dados fluviométricos regionais confiáveis. Recomenda-se em pesquisas futuras a análise da influência do uso da terra e das mudanças climáticas sobre as vazões de referência.

REFERÊNCIAS

- ACREMAN, M. C.; DUNBAR, M. J. Defining environmental river flow requirements: a review, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Munich, v.8, n. 5, p. 861-876. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004>, 2004. Disponível em: https://hess.copernicus.org/articles/8/861/2004/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 15 dez. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Disponibilidade hídrica superficial** (BHO 2017 5K). Mapa digital. Disponível em:
<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7ac42372-3605-44a4-bae4-4dee7af1a2f8>. Acesso: em 15 jul. 2024.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Regularização de vazão**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura, (Hidrologia aplicada - CIV 226). Disponível em:
<https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Fernando/leb1440/Aula%206/Regularizacao%20de%20Vazoes.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2024.

BENETTI, A. B.; LANNA, A.E; COBALCHINI, M.S. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 8. n. 2. p. 149-160, 2003. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/231246/000381157.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 jun. 2024.

BEDIENT, P. B.; HUBER, W. C.; VIEIRA, B. C. **Hidrologia aplicada**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília, 2020. Disponível em:
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 21 maio 2024.

COLOMBO, P. *et al.* Modeling the influence of small reservoirs on hydrological drought propagation in space and time. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 629, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130640>. Disponível em:
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169424000349?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 12 jul. 2025.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR. **Plan Hidrológico del Guadalquivir 2015-2021**. Sevilla, 2018. Disponível em:
https://www.chguadalquivir.es/html-mantenimiento/index.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 15 dez. 2025.

CUNHA, C. J. **Regularização das vazões sustentáveis de agroecossistemas no estuário do rio São Francisco**. 2015. 232 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em:
https://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/19161/4/2011_art_cafschettini.pdf. Acesso em: 30 maio 2024.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). **European waters: assessment of status and pressures 2018**. Luxembourg: European Union, 2018. Disponível em:
<https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water>. Acesso em: 08 jul. 2025.

GOIÁS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH).

Manual técnico de outorga. 2012. 1^a versão. Disponível em:

https://www.solisconsultoria.com.br/downloads/manual_tecnico_de_outorga_versao_01.pdf. Acesso em: 15 Jun. 2024.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portaria nº 48, de 04 de outubro de 2019.** Estabelece normas suplementares para a regularização dos recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. 2019. Disponível em: <https://siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49719>. Acesso em: 15 maio 2024.

LONGHI, E. H.; FORMIGA, K. T. M. Metodologias para determinar vazão ecológica em rios. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 20. p. 33-48, 2011. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/352. Acesso em: 05 jun. 2024.

LOPES, J. E.G.; SANTOS, R. C. P. **Capacidade de reservatórios.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2002. Disponível em:
<https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Fernando/leb1440/Aula%206/Capacidade%20de%20Reservatorios.pdf>. Acesso em: 20 maio 2024.

MURRAY-DARLING BASIN AUTHORITY (MDBA). **The basin plan:** a conceptual framework for the determination of environmentally sustainable level of take. Canberra: MDBA, 2012. Disponível em: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/aus181959.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.

MOREIRA, H.S. **Cenários de disponibilidade hídrica para concessão de outorga:** estudo de caso da bacia vertentes do Rio Grande. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias e Inovações Ambientais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018. Disponível em:
http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/30830/2/DISERTA%C3%87%C3%83O_Cen%C3%A1rio%20rio%20de%20disponibilidade%20h%C3%ADrica%20para%20concess%C3%A3o%20de%20outorga%20estudo%20de%20caso%20da%20Bacia%20Vertentes%20do%20Rio%20Grande.pdf. Acesso em: 22 jul. 2024.

MOURA, M. P.; ARAÚJO, F. C. Soares de; MOURA, M. B. P. Disponibilidade hídrica superficial do semiárido pernambucano. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 15., 2020, Caruaru. **Anais eletrônicos** [...] Porto Alegre: ABRHidro, 2020. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6904>. Acesso em: 23 maio 2024.

MOURA, M. S. B. *et al.* Aspectos hidrológicos e climáticos do Semiárido brasileiro: subsídios para gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 1-15, 2017. DOI: <https://10.1590/2318-0331.011716007>. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1112124>. Acesso em: 11 dez. 2024.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Vazões de referência no semiárido: limites e perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 189-196, 2012. DOI: <https://10.1590/S1415-43662012000200010>. Disponível em: <https://www.skoob.com.br/pt/book/478018?title=recursos-hidricos-em-regioes-semiaridas>. Acesso em: 08 mar. 2025.

MOLLE, F.; WESTER, P. **River basin trajectories**: societies, environments and development. Wallingford: CAB International, 2009.

OLIVEIRA, A. M. de *et al.* Serviços ecossistêmicos prestados por reservatórios no semiárido do Brasil. **Revista CERES**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 37-43, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/Revistadoceres/article/view/15131/10002>. Acesso em: 20 maio 2024.

RIBEIRO NETO, G. G. *et al.* Drought cycle analysis to evaluate the influence of a dense network of small reservoirs on drought evolution. **Water Resour. Res.**, New Jersey, v. 58, n.1, 2022, p. 21. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021WR030799>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2021WR030799>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SANTOS, M. V.; TORRES, L. F.; ALMEIDA, R. S. Morfologia fluvial e dinâmica de sedimentos: análise dos efeitos a jusante do complexo hidrelétrico do rio Madeira. **Confins - Revista Franco-Brasileira de Geografia**, Belém, v. 46, n. 46, 2020. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/30852>. Acesso em: 17 maio 2024.

SARMENTO, R. **Estado da arte da vazão ecológica no Brasil e no mundo**: projeto 704bra2041 da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura – UNESCO. Brasília, 2007. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br/media/2019/06/Vazao.Ecologica.Produto.02.Robson.Sarmento.20.06.07.pdf>. Acesso em: 12 maio 2024.

SISCAH – Sistema de Cálculo Hidrológico Aplicado: manual do usuário. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2007. Disponível em: <https://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>. Acesso em: 19 fev. 2025.

SOUTH AFRICA. Department of Water Affairs and Forestry (DWAF). **Water Resource Protection Policy**: ecological reserve determination methodology. Pretoria: DWAF, 2004.

TEXEIRA, K. T. **Rios intermitentes do semiárido brasileiro**: o efeito do ambiente e do espaço na estrutura da meta comunidade de peixes. 2023.84f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal do Ceará,

Ceará, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/73499/3/2020_tese_fkteixeira.pdf. Acesso em: 25 maio 2024.



TENNANT, D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. **Fisheries**, New Jersey, v. 1, n. 4, p. 6-10, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001%3C0006:IFRFFW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001%3C0006:IFRFFW%3E2.0.CO;2). Disponível em: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1577/1548-8446\(1976\)001%3C0006:IFRFFW%3E2.0.CO;2?msockid=2790adda01e16e902ad4b82f00506fbc](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1577/1548-8446(1976)001%3C0006:IFRFFW%3E2.0.CO;2?msockid=2790adda01e16e902ad4b82f00506fbc). Acesso em: 01 jun. 2024.

THARME, R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. **River Research and Applications**, New Jersey, v.19, p. 397-441. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.736>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.736>. Acesso em: 01 jun. 2024.

TOCANTINS. **Decreto nº 2432 de 06 de junho de 2005**. Regulamenta a outorga do direito de uso de recursos hídricos de que dispõe os artigos 8, 9 e 10 da Lei nº 1.307, de 22 de março de 2002. Disponível em: <https://central3.to.gov.br/arquivo/107424/>. Acesso em: 1 jun. 2024.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: UFRGS; ABRH, 2002. 256p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS; ABRH, 2002.

UNITED KINGDOM. Environment Agency. **Water resources planning guideline**: interim update. Bristol, 2014. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/water-resources-planning-guideline>. Acesso em: 08 jul. 2025.