

A CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES E A DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA OUTORGA NO ESTADO DO PARANÁ

**VITÓRIA NOVELINO BENTO GONZAGA¹; ELOY LEMOS DE MELLO¹;
BENEDITO MARTINS GOMES¹; MARCIO ANTONIO VILAS BOAS¹ E WAGNER
ALESSANDRO PANSERA¹**

¹ *Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, R. Universitária, 1619 - Universitário, Cascavel – PR – Brasil, CEP: 85819-110; vitorianovelino@yahoo.com.br; eloy.mello@unioeste.br; benedito.gomes@unioeste.br; marcio.vilasboas@unioeste.br*

² *Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, R. Cristo Rei, 19 - Vila Becker, Toledo – PR – Brasil, CEP: 85902-490; pansera@utfpr.edu.br*

1 RESUMO

O conhecimento da disponibilidade hídrica dos corpos d'água é imprescindível para a implementação do instrumento de outorga de uso de recursos hídricos. No estado do Paraná, a disponibilidade hídrica é estimada a partir da curva de permanência. No entanto, a curva de permanência é tradicionalmente obtida a partir de toda a série histórica de vazões, ordenada de forma decrescente, calculando-se então as vazões associadas às probabilidades de excedência. Esta curva é, portanto, sujeita aos eventos extremos de anos secos ou muito chuvosos. As curvas de permanência anuais representam o comportamento médio ou mediano da bacia hidrográfica, e podem ser utilizadas como alternativa para a estimativa da disponibilidade hídrica. Além disso, auxiliar a análise de risco inerente ao processo de outorga. O objetivo deste trabalho foi investigar a construção de curvas de permanência e intervalos de confiança aplicando técnicas estatísticas de estimação de quantis e reamostragem. Os resultados indicam que a curva de permanência anual tem grande potencial para flexibilizar a outorga no estado.

Palavras-chave: gestão da água, recursos hídricos, vazões mínimas.

**GONZAGA, V. N. B.; MELLO, E. L.; GOMES, B. M.; VILAS BOAS, M. A.;
PANSERA, E W. A.**

**FLOW DURATION CURVES AND WATER AVAILABILITY FOR GRANTING IN
THE STATE OF PARANÁ**

2 ABSTRACT

In Paraná, water availability for granting is estimated from the permanence curve, traditionally obtained from the entire historical flow rate series, ordered in a decreasing manner, and subsequently calculating the flow rates associated with the exceedance probabilities. It is therefore subjected to the extreme events of dry or very rainy years. The solution to this can be the use of annual permanence curves, which represent the average behavior of the river basin. In addition to that, obtaining confidence intervals associated with the permanence curves can assist the risk analysis inherent to the granting process. The

objective of this paper was to investigate the elaboration of permanence curves and confidence intervals by applying quantile estimation and resampling statistical techniques. The results indicate that the annual permanence curve presents significant potential to increase granting flexibility in the state.

Keywords: water management, water resources, minimum flows.

3 INTRODUÇÃO

A lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), prevê a implementação da outorga do direito de uso dos recursos hídricos, como importante instrumento de gestão. O conhecimento da disponibilidade hídrica e a estimativa de vazões de referência são etapas fundamentais neste processo (CRUZ; SILVEIRA, 2007).

No gerenciamento de uma bacia hidrográfica é importante atender a demanda dos usuários de recursos hídricos, ao mesmo tempo em que se deve garantir as vazões mínimas necessárias para a conservação dos recursos naturais. Deste modo, vazões de referência mais conservadoras, ou seja, mais restritivas, tendem a privilegiar a conservação dos recursos hídricos. Por outro lado, vazões de referência menos restritivas privilegiam o atendimento da demanda em detrimento do aspecto conservacionista (CRUZ; SILVEIRA, 2007).

As vazões de referência utilizadas no Brasil são a vazão com duração de sete dias e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$), e as vazões com permanência de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) (ANA, 2021). A vazão $Q_{7,10}$ é obtida a partir do ajuste de distribuições de probabilidade às séries anuais de vazões mínimas com duração de sete dias, sendo a vazão de referência mais restritiva dentre as três. As vazões Q_{90} e Q_{95} são obtidas a partir das curvas de permanência de longo período.

As curvas de permanência de longo período, para qualquer série histórica, são construídas com base no período completo de observação, e a análise das excedências

de vazão é realizada segundo uma abordagem probabilística (PUMO *et al.*, 2014). No entanto, elas costumam ser bastante sensíveis aos eventos hidrológicos extremos e conseqüentemente, as vazões de referência (Q_{90} e Q_{95}) costumam ser bastante restritivas, pois são afetadas pela ocorrência dos anos secos da série. Há também outro aspecto importante a ser destacado sobre as curvas de permanência de longo período: não é possível avaliar a incerteza associada às estimativas das vazões de referência (WMO, 2008).

Uma alternativa que pode ser aplicada para flexibilizar a outorga, sem perder de vista a necessária conservação da água e do meio, é a utilização de vazões de referência que levem em consideração a variação interanual das vazões (ALMEIDA; CURI, 2016).

Vogel e Fennessey (1994) sugeriram um método não paramétrico para a construção de curvas de permanência individuais para cada ano, possibilitando calcular a vazão mediana associada à cada probabilidade de excedência. As vazões medianas formam a curva de permanência anual, que representa a probabilidade de a vazão ser excedida em um ano típico (nem chuvoso e nem seco). A curva de permanência anual é, portanto, menos sensível aos períodos secos e ao tamanho das séries históricas (SMAKHTIN, 2001).

Além disso, essa abordagem permite a construção de intervalos de confiança para avaliar a incerteza associada às curvas. Esses intervalos representam a variabilidade das vazões de permanência para cada ano, isto é, a probabilidade de que em um ano qualquer a vazão de permanência esteja

dentro desse intervalo (VOGEL; FENNESSEY, 1994). Com isso, os gestores de recursos hídricos podem estimar o risco de que a disponibilidade hídrica seja diferente da vazão outorgada (CRUZ; SILVEIRA, 2007).

Mais recentemente, Pumo *et al.* (2014), apresentaram um modelo hidrológico para a construção de curvas de permanência anuais para bacias hidrográficas sem registros históricos de vazão. O modelo, embora complexo, exige apenas alguns parâmetros e dados climáticos como entrada. O modelo foi testado em uma pequena bacia hidrográfica na Itália e parece ter potencial para aplicação dentro de um esquema de regionalização de vazões. A principal desvantagem apresentada pelos autores é a tendência de subestimar as vazões nos casos em que o escoamento subterrâneo é o principal contribuinte da vazão no curso d'água. Em boa parte do Brasil isto ocorre em períodos secos ou de estiagem prolongada. Para os casos em que há registro histórico de vazões não existe vantagem em aplicar este modelo.

No Brasil, Cruz e Tucci (2008), compararam as curvas de permanência de longo período com as curvas de permanência anuais, obtidas de acordo com a sugestão de Vogel e Fennessey (1994). Eles observaram que as vazões com permanência maior que 40%, obtidas a partir das curvas anuais foram, quase sempre, superiores às vazões obtidas com base nas curvas de longo período. Os autores afirmam que o método de cálculo das vazões de referência com base anual é promissor para o processo de gestão dos recursos hídricos e para o estabelecimento de critérios de outorga, pois não restringe o uso da água para diferentes atividades socioeconômicas.

O método proposto por Vogel e Fennessey (1994), e aplicado no Brasil por

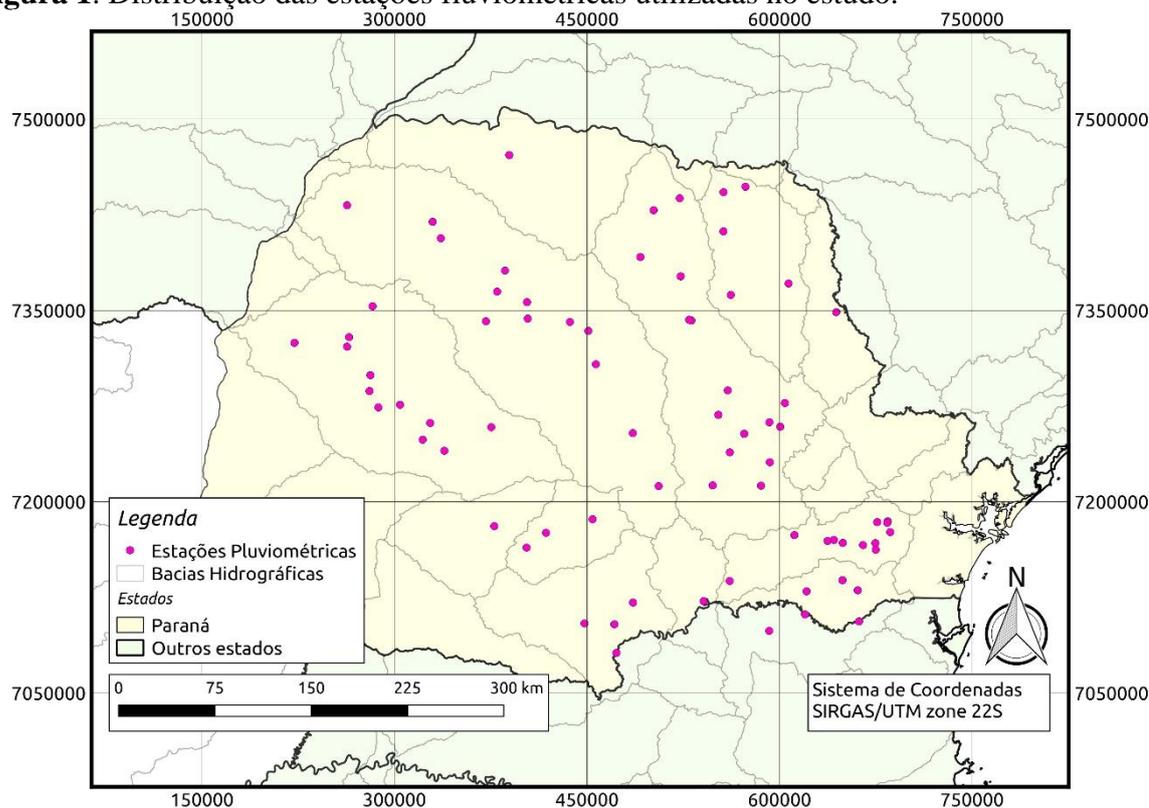
Cruz e Tucci (2008), produz curvas de permanência anuais satisfatórias e, conseqüentemente, boas estimativas de vazões de referência para anos típicos. No entanto, os intervalos de confiança associados às curvas costumam ser muito amplos, porque os limites superiores e inferiores são definidos pela posição dos valores de vazão ordenados (em cada probabilidade de excedência). Na atualidade, os recursos computacionais são acessíveis e, portanto, é justificável a adoção de técnicas estatísticas mais sofisticadas para a construção dos intervalos de confiança.

Em vista disso, o objetivo deste estudo foi avaliar a variação interanual na disponibilidade hídrica para outorga em bacias hidrográficas no estado do Paraná, por meio da comparação entre a vazão de referência atual (Q_{95}), obtida pela curva de permanência de longo período e a vazão de referência com base anual, associadas à intervalos de confiança.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo e séries hidrológicas

Para a realização deste estudo foram analisadas as séries históricas de 75 estações fluviométricas distribuídas por sete bacias hidrográficas no estado do Paraná (Figura 1). As séries foram obtidas por meio do portal Hidroweb, mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2021). O tamanho médio das séries é de 42 anos, variando de 23 a 78 anos, e não apresentam falhas dentro do período de registro. Todos os cálculos e análises estatísticas foram realizados com os softwares R (R CORE TEAM, 2018) e Rstudio (RSTUDIO TEAM, 2016).

Figura 1. Distribuição das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

4.2 Curva de permanência de longo período

A curva de permanência de longo período foi elaborada relacionando-se a frequência e a magnitude das vazões diárias das séries históricas. Para a construção das curvas as vazões foram divididas em 50 classes, cujos intervalos foram calculados com a aplicação da equação 1:

$$Q_{j+1} = \exp\left(\ln Q_j + \frac{\ln Q_{\max} - \ln Q_{\min}}{50}\right) \quad (1)$$

Em que: Q_{j+1} é o limite superior de cada intervalo de classe (para $j=1$, $Q_j = Q_{\min}$); Q_{\max} é a vazão máxima da série; Q_{\min} é a vazão mínima da série.

Depois de definir os intervalos, a frequência associada a cada classe foi calculada pela equação 2:

$$f_k = 100 \frac{N_{qk}}{N} \quad (2)$$

Em que: f_k é a frequência associada a cada intervalo de classe k ; N_{qk} é o número de vazões médias diárias observadas dentro do intervalo de classe k ; N é o número total de vazões médias diárias da série.

As curvas foram construídas plotando-se a frequência acumulada no eixo das abscissas, e os limites inferiores de cada classe no eixo das ordenadas.

4.3. Curva de permanência anual

Para a elaboração das curvas de permanência anuais os valores de vazão de cada série histórica foram agrupados de acordo com o ano de ocorrência. Por consequência, cada ano da série apresentava 365 valores de vazão, que foram, em seguida, classificados em ordem decrescente (para os anos bissextos a maior vazão foi descartada). Na tabela 1 é

possível visualizar um exemplo de como os dados foram organizados.

Tabela 1. Exemplo de agrupamento e ordenamento decrescente das vazões para cada ano da série hidrológica (Estação Tamanduá / Código 64242000 / Bacia hidrográfica do Itararé)

Posição	1976	1977	1978	1979	1980	...	2000	2001	2002	2003
1	93,0	105,4	141,5	140,8	133,4	...	231,3	132,7	198,3	279,6
2	88,2	82,8	95,5	139,5	109,8	...	172,5	118,2	187,8	168,2
3	87,0	78,8	81,7	129,4	95,5	...	142,9	106,7	178,3	149,8
...
361	12,2	8,9	10,9	12,9	9,5	...	10,8	20,9	14,6	9,1
362	12,2	8,9	10,5	12,9	9,5	...	10,8	20,9	14,3	9,1
363	12,2	8,9	10,5	12,9	9,5	...	10,8	20,9	13,9	8,8
364	12,2	8,3	9,9	12,6	9,5	...	10,8	20,9	13,9	8,3
365	10,6	6,8	9,9	12,2	9,2	...	10,5	20,9	11,1	8,0

De acordo com esta forma de organização das vazões, conforme ilustrado na tabela 1, se pode concluir que é possível a elaboração de uma curva de permanência individual para cada ano da série, e que estas curvas devem ser diferentes umas das outras, devido a variação natural das vazões de um ano para outro. Para resumir esta variabilidade natural é possível calcular uma medida de tendência central, como a média ou a mediana (VOGEL; FENNESSEY, 1994). Em outras palavras, é possível calcular uma curva de permanência média ou mediana que represente o

comportamento médio da estação, denominada *curva de permanência anual* e, além disso, obter o seu intervalo de confiança.

A mediana foi calculada com o estimador não paramétrico proposto por Harrell e Davis (1982). Para isso, as vazões (em cada posição) foram tratadas com uma variável aleatória, de tamanho n , provenientes de uma distribuição de probabilidades contínua com função $F(\cdot)$. Se $X_1 \leq \dots \leq X_n$ representa a estatística de ordem da amostra, o valor esperado da k -ésima estatística de ordem é dado por:

$$E[X_{(k)}] = \frac{1}{\beta[k, n-k+1]} \int_{-\infty}^{\infty} x F(x)^{k-1} [1 - F(x)]^{n-k} dF(x) \quad (3)$$

$$E[X_{(k)}] = \frac{1}{\beta[k, n-k+1]} \int_0^1 F^{-1}(y) y^{k-1} (1-y)^{n-k} dy \quad (4)$$

Em que: $\beta[a, b]$ representa a função beta. Tomando $k = (n+1)p$ (independente de k ser ou não um inteiro) de modo que $E[X_{(n+1)p}]$ converge para o estimador de

quantil populacional $F^{-1}(p)$, para $p \in (0, 1)$, à medida que $n \rightarrow \infty$, chega-se ao estimador de Harrell e Davis:

$$Q_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i X_{(i)} \quad (5)$$

Onde:

$$\lambda_i = \frac{1}{\beta[(n+1)p, (n+1)(1-p)]} \int_{\frac{(i-1)}{n}}^{\frac{i}{n}} y^{(n+1)p-1} (1-y)^{(n+1)(1-p)-1} dy \quad (6)$$

$$\lambda_i = \frac{I_i[(n+1)p, (n+1)(1-p)]}{n} - \frac{I_{(i-1)}[(n+1)p, (n+1)(1-p)]}{n} \quad (7)$$

$EI_x[a,b]$ representa a função beta incompleta. Para mais detalhes, discussão e comparação de estimadores de quantis, especialmente da mediana, recomenda-se a leitura dos textos de Harrel e Davis (1982), Parzen (1979), Sheather e Marron (1990) e Vogel e Fennessey (1994).

O intervalo de confiança para a mediana foi calculado pelo procedimento de *bootstrap*, proposto por Efron (1979), que é um método de reamostragem com reposição. O *bootstrap* consiste, geralmente, no seguinte procedimento: 1) obtenção de uma amostra populacional de tamanho n ; 2) extração de uma amostra, com reposição, a partir da amostra original, com o mesmo tamanho n ; este passo é repetido B vezes; 3) cálculo da mediana para cada amostra e, portanto, há B estimativas da mediana; 4) construção da distribuição amostral e, a partir dela, o cálculo do erro padrão da estimativa e do intervalo de confiança.

4.4. Comparação entre as curvas de permanência de longo período e as curvas anuais

Primeiramente, foi realizada a comparação visual entre as curvas, para cada estação fluviométrica analisada. Em

seguida, foi calculada a vazão com permanência de 95%, tanto para a curva de permanência de longo período (Q_{95lp}) quanto para a curva de permanência anual (Q_{95a}). A diferença entre Q_{95a} e Q_{95lp} foi denominada ΔQ_{95} , que também pode ser apresentada em termos absolutos (Equação 8) ou em termos percentuais (Equação 9):

$$\Delta Q_{95} = Q_{95a} - Q_{95lp} \quad (8)$$

$$\Delta Q_{95} = 100 \left(\frac{Q_{95a}}{Q_{95lp}} - 1 \right) \quad (9)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas 2 e 3 apresentam as vazões de referência calculadas a partir da curva de permanência de longo período (Q_{95lp}) e da curva de permanência anual (Q_{95a}) para todas as estações fluviométricas utilizadas no estudo, bem como, a diferença percentual entre elas (ΔQ_{95}) e o intervalo de confiança da Q_{95a} (IC). Observa-se que, para todas as estações estudadas, o valor de Q_{95a} foi maior do que o valor de Q_{95lp} , ou seja, a Q_{95} estimada a partir da curva de permanência anual foi sempre maior do que a estimativa a partir da curva de longo período.

Tabela 2. Vazão com permanência de 95% obtida das curvas de permanência de longo período (Q_{95lp}) e anual (Q_{95a}) para as bacias do Cinzas, Iguaçu, Itararé e Pirarapó

Código	Bacia	Área (km²)	Q95lp (m³/s)	Q95a (m³/s)	IC (m³/s)		DQ95 (%)
64360000	Cinzas	2020	6,6	9,4	8,3	10,9	41,7
64370000	Cinzas	5637	11,5	16,1	14,8	18,1	39,9
64380000	Cinzas	1070	2,9	4,3	3,6	5,1	44,6
64382000	Cinzas	2610	7,5	9,6	8,3	11,0	28,7
64390000	Cinzas	3490	5,6	8,1	7,4	8,9	44,1
65006055	Iguaçu	89	0,3	0,6	0,4	0,8	88,7
65006075	Iguaçu	385	0,8	2,2	1,8	2,6	163,1
65010000	Iguaçu	106	0,8	0,9	0,8	1,1	20,7
65011400	Iguaçu	43	0,6	0,9	0,8	1,1	41,6
65017006	Iguaçu	1160	6,2	7,6	6,8	8,7	22,3
65017035	Iguaçu	68	0,3	0,4	0,3	0,5	46,1
65019700	Iguaçu	262	0,4	1,5	0,8	2,6	265,3
65025000	Iguaçu	2330	13,1	16,2	13,8	19,2	23,4
65027000	Iguaçu	231	1,0	1,4	1,2	1,6	40,4
65028000	Iguaçu	2740	17,7	20,6	18,1	23,6	16,4
65035000	Iguaçu	3620	14,8	19,5	18,0	21,6	31,6
65060000	Iguaçu	6050	24,1	32,5	30,4	34,5	34,9
65090000	Iguaçu	803	6,8	8,0	7,2	8,7	17,2
65100000	Iguaçu	3450	0,8	0,9	0,8	1,1	20,7
65135000	Iguaçu	605	3,6	4,3	4,0	4,7	20,6
65136550	Iguaçu	939	6,3	8,0	7,0	9,5	26,6
65155000	Iguaçu	939	10,5	13,3	12,0	14,9	27,0
65220000	Iguaçu	18600	84,5	106,8	99,9	116,7	26,4
65310000	Iguaçu	24200	104,7	129,0	121,5	137,5	23,2
65365000	Iguaçu	65	1,1	1,3	1,1	1,4	17,4
65370000	Iguaçu	1010	4,1	5,3	4,6	6,0	28,8
65385000	Iguaçu	1380	5,5	6,0	5,1	6,7	9,8
65415000	Iguaçu	327	1,7	2,1	1,8	2,4	21,8
65810000	Iguaçu	726	2,9	3,6	3,2	4,1	25,1
65815050	Iguaçu	2220	12,5	16,6	13,6	21,6	32,8
65825000	Iguaçu	3930	20,6	28,0	25,9	30,9	35,9
65855000	Iguaçu	1490	5,5	8,3	6,8	9,9	51,6
64242000	Itarare	1690	11,6	13,6	11,9	15,3	17,2
64550000	Pirapo	4490	29,8	35,1	32,7	37,6	17,8

IC é o intervalo de confiança de Q_{95a} ; ΔQ_{95} é o incremento na estimativa de Q_{95} feita com a curva anual em relação a curva de longo período

Tabela 3. Vazão com permanência de 95% obtida das curvas de permanência de longo período (Q_{95lp}) e anual (Q_{95a}) para as bacias do Ivaí, Piquiri e Tibagi

Código	Bacia	Área (km²)	Q95lp (m³/s)	Q95a (m³/s)	IC (m³/s)		DQ95 (%)
64620000	Ivaí	1090	3,4	4,6	4,1	5,2	34,1
64625000	Ivaí	3560	9,0	10,9	10,0	12,7	21,1
64645000	Ivaí	8540	34,9	40,8	37,4	45,6	16,9
64652000	Ivaí	2610	5,3	6,4	5,5	7,6	21,5
64655000	Ivaí	12700	33,6	49,8	43,0	57,3	48,2
64659000	Ivaí	3290	5,7	7,6	6,2	9,1	33,0
64660500	Ivaí	19400	65,5	83,4	68,7	104,0	27,3
64671000	Ivaí	853	5,7	7,0	5,7	8,7	23,5
64673000	Ivaí	1530	11,3	14,8	12,5	16,9	31,0
64675002	Ivaí	23100	93,1	114,0	96,4	134,0	22,4
64682000	Ivaí	818	9,5	10,8	10,1	11,5	13,7
64685000	Ivaí	28400	137,3	166,0	147,6	189,5	20,9
64693000	Ivaí	34400	218,6	241,0	219,3	273,5	10,2
64767000	Piquiri	3540	13,5	18,5	16,2	20,3	37,0
64771500	Piquiri	4160	13,0	18,7	15,9	21,2	43,8
64773000	Piquiri	757	1,4	2,0	1,6	2,3	40,7
64775000	Piquiri	2520	9,1	11,7	9,9	13,3	28,6
64785000	Piquiri	1340	8,7	12,0	10,6	13,8	37,9
64790000	Piquiri	598	4,7	6,2	5,2	7,5	31,9
64795000	Piquiri	11200	47,3	60,9	51,7	71,3	28,8
64799500	Piquiri	12100	64,6	82,3	68,5	99,5	27,4
64810000	Piquiri	2040	20,4	24,9	23,0	27,2	22,1
64815000	Piquiri	2960	27,7	31,5	29,4	33,9	13,7
64820000	Piquiri	17400	111,1	133,0	116,8	155,0	19,7
64830000	Piquiri	20900	142,5	167,0	146,0	198,2	17,2
64440000	Tibagi	1340	5,1	6,1	5,2	7,2	19,2
64442800	Tibagi	1340	4,9	6,3	5,4	7,4	28,6
64447000	Tibagi	5710	21,2	28,7	23,6	32,6	35,4
64450002	Tibagi	433	1,8	2,6	2,3	3,4	46,7
64453000	Tibagi	1040	6,7	8,4	7,6	9,4	25,2
64460000	Tibagi	744	2,4	3,4	2,8	3,9	40,4
64465000	Tibagi	8840	34,6	48,1	43,1	52,7	39,0
64475000	Tibagi	1190	3,6	4,6	3,7	5,7	26,4
64477020	Tibagi	208	0,8	1,2	1,0	1,5	48,8
64477600	Tibagi	1590	7,8	9,6	8,4	10,9	22,4
64491000	Tibagi	16100	60,5	68,0	61,9	83,7	12,4
64491260	Tibagi	203	0,5	0,7	0,5	0,8	33,2
64500000	Tibagi	59	0,6	0,8	0,7	0,9	25,7
64502000	Tibagi	820	6,4	7,3	6,0	10,5	14,1
64507000	Tibagi	21900	76,3	116,0	103,3	127,8	52,0
64508500	Tibagi	1050	3,9	5,5	4,8	6,3	40,5

IC é o intervalo de confiança de Q_{95a} ; ΔQ_{95} é o incremento na estimativa de Q_{95} feita com a curva anual em relação a curva de longo período

Para melhor interpretação dos resultados, algumas estatísticas descritivas relacionadas a ΔQ_{95} são apresentadas na tabela 4, agrupadas de acordo com as principais bacias hidrográficas abrangidas pelo estudo. Em média, o valor de ΔQ_{95} foi de 34,6%, variando de 24,9% na bacia do Ivaí a 43,7% na bacia do Iguaçu.

Na análise global, pode-se observar também que a mediana é igual a 27,4%, ou seja, em 50% das estações utilizadas neste estudo o valor de ΔQ_{95} foi superior a 27,4%. Destacam-se, neste caso, a bacia do Cinzas, em que a mediana foi igual a 41,7%, e a do Tibagi, com mediana igual a 30,9%.

Os valores de ΔQ_{95} apresentados nas tabelas 2 e 3 evidenciam que a estimativa de Q_{95} realizada a partir da curva permanência anual pode ser uma forma de flexibilizar a outorga, porque ela se baseia no comportamento hidrológico mediano das bacias hidrográficas, e não no comportamento atípico que ocorre em anos secos ou muito chuvosos. Na maioria absoluta das estações analisadas, a vazão estimada a partir da curva de permanência de longo período (Q_{95lp}) foi menor do que o próprio limite inferior do intervalo de confiança de Q_{95a} , com exceção de apenas duas estações: 65385000 na bacia do Iguaçu (Tabela 2), e 64502000 na bacia do Tibagi (Tabela 3).

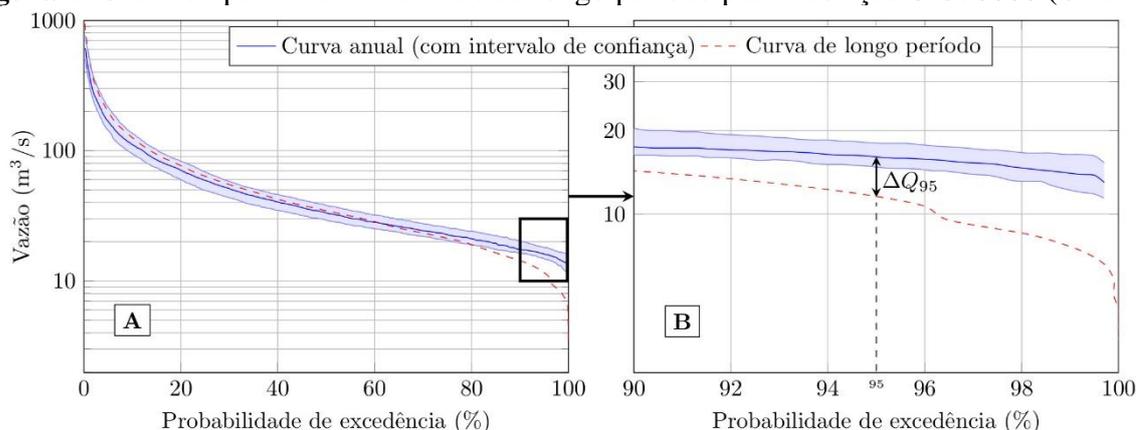
Tabela 4. Estatísticas descritivas de ΔQ_{95} agrupadas de acordo com as principais bacias hidrográficas utilizadas no estudo

Bacia Hidrográfica	Média	Mediana	1º Quartil	3º Quartil	Máximo	Mínimo
Ivaí	24,9	22,7	20,9	31,0	48,2	10,2
Cinzas	39,8	41,7	39,9	44,1	44,6	28,7
Piquiri	29,1	28,7	21,5	37,3	43,8	13,7
Tibagi	31,9	30,9	24,5	40,4	52,0	12,4
Iguaçu	43,7	26,6	21,2	38,2	265,3	9,8
Global	34,6	27,4	21,0	39,5	265,3	9,8

A diferença entre a curva de permanência de longo período e a curva de permanência anual pode ser facilmente observada com auxílio da figura 2. A curva de longo período é superior à curva anual até a probabilidade de excedência de, aproximadamente, 60% e, a partir deste ponto, ela passa a ser inferior à curva anual. Até a probabilidade de excedência de 80% ela permanece dentro do intervalo de confiança da curva anual e, depois disso,

ela cai significativamente (Figura 2A). Esse comportamento foi semelhante para as demais estações estudadas.

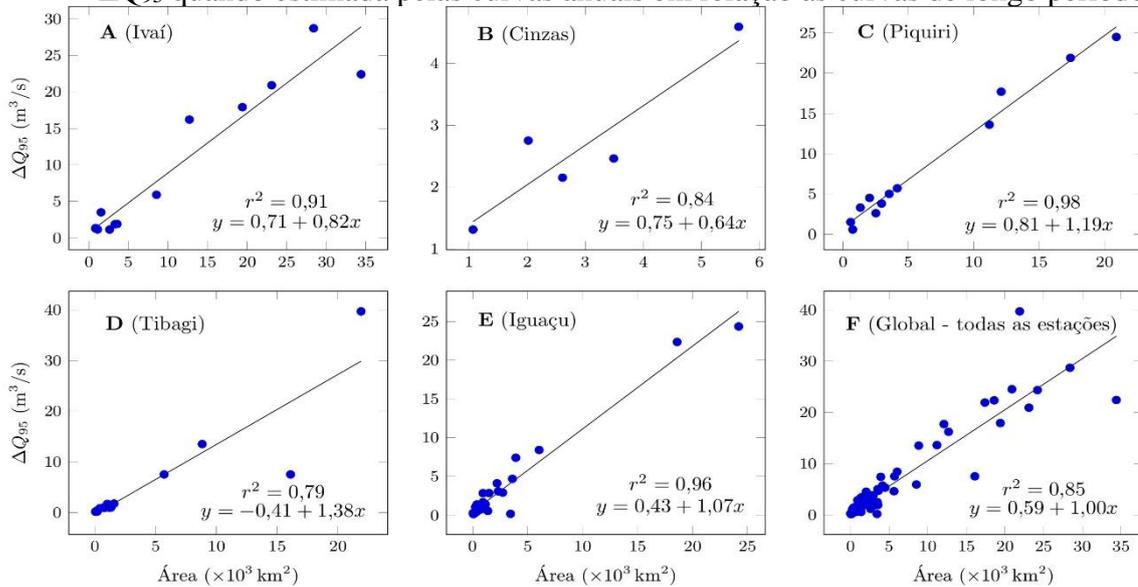
Na figura 2B é possível observar a ampliação visual aplicada às curvas de permanência, de modo a detalhar a faixa de maior interesse para os estudos de disponibilidade hídrica e outorga, e o valor ΔQ_{95} . No exemplo em questão, ΔQ_{95} é igual a 4,6 m³/s, ou 39,9%.

Figura 2. Curva de permanência anual e de longo período para a estação 64370000 (Cinzas).

É importante destacar como o intervalo de confiança é próximo à curva de permanência anual. Isto se deve à aplicação da técnica de reamostragem *bootstrap*. No exemplo apresentado na figura 2 o valor de Q_{95} estimado a partir da curva de permanência anual foi igual a $16,1 \text{ m}^3/\text{s}$, compreendido no intervalo de confiança $14,8 \leq Q_{95a} \leq 18,1 \text{ m}^3/\text{s}$. O valor estimado a partir da curva de permanência de longo período (Q_{95lp}) foi igual a $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, mesmo que adotássemos a curva de permanência anual com cautela, admitindo como indicativo da disponibilidade hídrica o limite inferior do intervalo de confiança, ainda assim, teríamos um acréscimo de 28,7% na disponibilidade hídrica, em comparação com a curva de permanência de longo período. Conclusão semelhante foi apresentada por Cruz e Silveira em 2007.

A análise de regressão linear demonstrou que há tendência de aumento no valor de ΔQ_{95} à medida que aumenta a área de drenagem (Figura 3). A regressão apresentada na figura 3F (Global - todas as estações) apresentou um valor de R^2 igual a 0,85 e coeficiente linear próximo de zero. Quando as estações foram separadas em grupos, de acordo com as bacias hidrográficas abrangidas pelo estudo (Figura 3A-E), os valores de R^2 permaneceram elevados, variando de 0,79 a 0,98, e os valores do coeficiente linear permaneceram próximos de zero. Estes resultados indicam que as equações de regressão representam muito bem a variação de ΔQ_{95} em função da área de drenagem.

Figura 3. Regressão linear entre a área das bacias hidrográficas e o incremento no valor de ΔQ_{95} quando estimada pelas curvas anuais em relação às curvas de longo período.



Portanto, quanto maior a área de drenagem maior deve ser a vantagem em se adotar a curva de permanência anual, que pode flexibilizar consideravelmente a outorga. Por outro lado, para áreas de drenagem muito pequenas o valor de ΔQ_{95} também será reduzido, ou seja, a estimativa de Q_{95} a partir da curva de permanência anual não será muito diferente daquela feita com a curva de permanência de longo período. Isto pode ter consequência importante no caso de cursos d'água que se encontram na cabeceira das grandes bacias hidrográficas e que são bastante suscetíveis às ações antrópicas. Nestes casos, a outorga deve ser mais restritiva e criteriosa.

Não houve correlação significativa entre os valores de ΔQ_{95} e a extensão das séries históricas (em anos). Esse fato é visto como positivo, e ao mesmo tempo, esperado, pois a curva de permanência anual representa o comportamento mediano da bacia hidrográfica, sendo por este motivo, mais robusta (independe do tamanho da série e não é influenciada excessivamente pela ocorrência de anos atípicos).

6 CONCLUSÕES

As estimativas de disponibilidade hídrica feitas com a curva de permanência anual, assim como os intervalos de confiança obtidos com a aplicação da técnica de reamostragem *bootstrap*, são robustas, pois não estão excessivamente suscetíveis à presença de anos secos ou muito chuvosos na série histórica.

As estimativas de disponibilidade hídrica feitas com a curva de permanência anual são sempre maiores do que aquelas feitas com a curva de permanência de longo período, o que permite flexibilização na outorga do direito de uso dos recursos hídricos.

A adoção da curva de permanência anual é tanto mais vantajosa quanto maior for a área de drenagem da bacia hidrográfica.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A.; CURI, W. F. Gestão do uso de água na bacia do Rio Paraíba, PB, Brasil com base em modelos de outorga e

cobrança. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 11, n. 4, p. 989-1005, 2016.

ANA. **HIDROWEB v3.2.7**. Brasília, DF: ANA, 2018. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 07 jun. 2022.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 1997, ano CXXXV, n. 6, p. 470-474, 9 jan. 1997.

CRUZ, J. C.; SILVEIRA, G. L. Disponibilidade hídrica para outorga (I): avaliação por seção hidrológica de referência. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 51-64, 2007.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.

EFRON, B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. **Annals of Statistics**, Beachwood, v. 7, n. 1, p. 1-26, 1979.

HARRELL, F. E.; DAVIS, C. E. A new distribution-free quantile estimator. **Biometrika**, Oxford, v. 69, n. 3, p. 635-640, 1982.

PARZEN, E. Nonparametric Statistical Data Modeling. **Journal of the American Statistical Association**, London, v. 74, n. 365, p. 105-121, 1979.

PUMO, D.; VIOLA, F.; LOGGIA, G. L.; NOTO, L. V. Annual flow duration curves assessment in ephemeral small basins. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 519, p. 258-270, 2014.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 8 jun. 2021.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Boston: RStudio, Inc., 2016. Disponível em: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>. Acesso em: 8 jun. 2021.

SHEATHER, S. J.; MARRON, J. S. Kernel Quantile Estimators. **Journal of the American Statistical Association**, London, v. 85, n. 410, p. 410-416, 1990.

SMAKHTIN, V. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 240, n. 3/4, p. 147-186, 2001.

VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow-Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 120, n. 4, p. 485-504, 1994.

WMO. **Manual on Low-flow Estimation and Prediction**. Geneva: World Meteorological Organization, 2008. (Operational Hydrology Reports, n. 50).