

Determinação do tirante mínimo da hidrovia do Tocantins e Araguaia

Marcelo de Miranda Reis, Cassia Vanessa de Castro*, José Carlos Cesar Amorim
 Instituto Militar de Engenharia (IME)
 Praça General Tibúrcio, 80, CEP:22290-270,
 Praia Vermelha, Rio de Janeiro/RJ, Brasil,
 *ccassiav@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo calcular o tirante de escoamento com permanência de 90% de nível d'água mínimo anual, com período de recorrência de 10 anos para as estações fluviométricas existentes na Hidrovia do Tocantins e Araguaia. Para a análise dos dados utilizou-se os métodos estatísticos de Gumbel para mínimos e Weibull. Esses estudos são importantes para avaliar as condições de navegabilidade da hidrovia tanto em trechos em que a navegação já ocorre livremente durante a maior parte do ano, como em locais onde necessitam de obra de dragagens. Para o cálculo dos volumes de dragagem é necessário conhecer o tirante mínimo com permanência de 90% para TR de 10 anos. Os resultados mostram que a distribuição de Weibull há uma tendência de ocorrerem níveis d'água menores comparados com os resultados da distribuição de Gumbel para mínimos para as séries dos postos fluviométricos da hidrovia do Tocantins e Araguaia.

PALAVRAS-CHAVE: Curva de permanência. Cotas mínimas. Gumbel. Weibull. Hidrovia.

ABSTRACT: A calculation of the depth of fluid flow in the fluviometrics stations located in the Tocantins and Araguaia Waterway is presented with 90% of the minimum annual water level in a recurrence time of 10 years. For the data analysis the Gumbel and the Weibull statistics methods were used. This study is important to determine the navigability conditions of the waterway in locations that are navigable through most of the year and in parts that need dredging works. To proper calculate the dredging volumes it is necessary to know the minimum depth of flow with 90% of the minimum annual water level in a recurrence time of 10 years. The results obtained with the Weibull distribution show a tendency for smaller water levels when compared with the results obtained with the Gumbel distribution.

KEYWORDS: Permanence curve. Minimum depth. Gumbel. Weibull. Waterway

1. Introdução

A Hidrovia Tocantins e Araguaia apresenta longos trechos navegáveis e posição geográfica privilegiada com grande potencial para o escoamento da produção de grãos e minérios. Por esse motivo foi objeto de estudo do Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia [1]. Também fez parte do projeto de integração nacional do corredor de transporte multimodal eixo Norte-Sul desenvolvido pela Confederação Nacional de Transporte [2]. O plano é ligar a Região Norte à Região Sul alternando os modos de transporte entre aquaviário e rodoviário por meio das hidrovias dos rios Tocantins – Araguaia e Paraná e das rodovias BR-153, BR-472, BR-258, BR-158 e BR-163.

Para que seja possível realizar o transporte

pela hidrovia e atender a um calado que comporte embarcações tipo, deve-se conhecer a cota limite para a navegação, acima dela é possível navegar. A curva de permanência define a parcela do tempo amostrado que poderá existir navegação [3]. Para esse estudo foi definido a permanência do tirante mínimo em 90% do tempo para um tempo de retorno de 10 anos e a partir desse tirante pode-se estimar os volumes a serem dragados ou derrocados.

O objetivo desse trabalho é estabelecer uma metodologia de cálculo de tirante mínimo de escoamento com permanência de 90% de nível d'água anual, com período de recorrência de 10 anos (TR=10 - estudo de cotas mínimas) para estações fluviométricas existentes na calha de uma hidrovia aplicado ao Tocantins e Araguaia. O cálculo de tirante mínimo foi realizado utilizando a distribuição de Weibull e Gumbel para mínimas. Dentro dessa linha de pesquisa Gottschalk *et al.* [4] e Finkler *et al.*

[5] estudaram distribuições estatísticas aplicadas para vazões mínimas, Leme *et al.* [6] determinaram a vazão mínima anual de sete dias consecutivos com período de retorno de 10 anos para o médio rio Jaguari Mirim e Kankam-Yeboah *et al.* [7] caracterizaram o regime de baixo fluxo da Bacia do Volta Preta usando vazões médias diárias por meio da curva de permanência. No entanto, não há muitos estudos no Brasil referente ao tirante mínimo para navegação. Observa-se que a maioria dos estudos são relacionados à disponibilidade hídrica [8], [9], [10].

Segundo DNIT [11], no período das cheias, é possível navegar até 2.000 km pelas águas do rio Tocantins. Neste percurso é utilizado uma eclusa existente na barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. No período de seca, a navegação fica comprometida a partir do lago de Tucuruí devido ao Pedral do Lourenço, um trecho de afloramentos rochosos que impedem a navegação comercial de grande porte entre o final do reservatório da hidrelétrica e a cidade de Marabá (PA).

O resultado oriundo da metodologia permitirá calcular os volumes de dragagem para viabilizar a utilização do rio como via navegável, tanto em trechos onde a navegação já ocorre livremente durante a maior parte do ano, como em locais onde necessitam de obras, ou seja, terá disponibilidade de calado em regime permanente para atender e transportar principalmente as cargas agrícolas provenientes das safras de grãos das regiões Norte e Centro-Oeste do país. Não faz parte dessa pesquisa o cálculo de volumes de dragagem.

2. Área de estudo

A Hidrovia do Tocantins e Araguaia tem aproximadamente 4.375 km de extensão e abrange os estados do Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal [12].

A Bacia Hidrográfica do Tocantins/Araguaia tem 967.059 km² de área, o equivalente a 11% do território brasileiro, sendo Goiás (26,8%), Tocantins (34,2%), Pará (20,8%), Maranhão (3,8%), Mato Grosso (14,3%) e Distrito Federal (0,1%) [13].

As regiões abrangentes da Bacia do Tocantins estão compostas de: rio Araguaia, rio Paranã, rio das Almas, rio Maranhão, rio Tocantinzinho, rio Cana Brava, rio Dos Patos, rio Santa Clara e rio Uru.

- Os trechos estudados têm extensões de:
- Da foz do rio Tocantins até Peixe com 1.515km;
- Da foz do rio Araguaia até Barra do Garças com 1.716km;
- Ilha do Bananal o trecho do berço do Javaés com 427km;
- Do rio das Mortes de sua foz até Nova Xavantina com 567km;

Da foz do rio Itacaiúnas até a foz do rio Parauapeba com aproximadamente 150km [12].

A **figura 1** apresenta a visão geral da área de estudo.

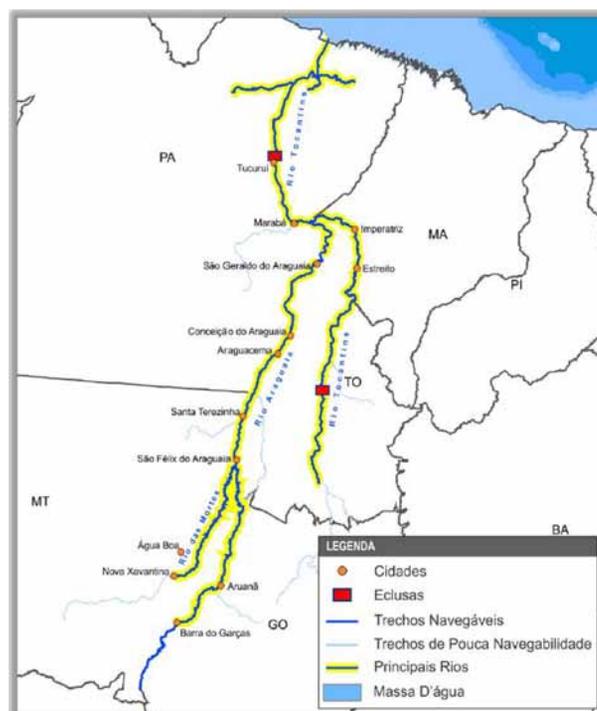


Fig. 1: Visão geral da área de estudo Fonte: ANTAQ [14]

3. Materiais e métodos

Buscou-se pesquisar os dados hidrológicos de fontes confiáveis e utilizar diretrizes empíricas fundamentadas. Desta forma, foi realizada uma consulta no mapa da Rede Hidrometeorológica e no Inventário de Estações Fluviométricas existente no sítio eletrônico da (ANA) [15].

Primeiro, detectou-se todas as estações fluviométricas existentes nos segmentos de rios da hidrovia do Tocantins e Araguaia. As **tabelas 1 a 5** apresentam as estações existentes em cada trecho com o respectivo código da estação utilizado pela ANA e usado no estudo para a identificação de cada estação.

Tab. 1 – Rio Tocantins até Araguaia

Estação	Código Estação
Nazaré dos Patos	29750000
Tucuruí	29700000
Itupiranga	29200000
Marabá	29050000
Descarreto	23700000
Tocantinópolis	23600000
Tupiratins	23100000
Miracema do Tocantins	22500000
Peixe	22050001

Fonte: ANA [15] adaptado

Tab. 2 – Rio Araguaia – Barra das Garças

Estação	Código Estação
Araguatins	28850000
Xambioá	28300000
Conceição do Araguaia	27500000
Araguacema (Chácara Araguaia)	26320000
São Felix do Araguaia	26350000
Luiz Alves	25950000
Bandeirantes	25700000
Aruanã	25200000
Araguaiana	24850000
Barra do Garças	24700000

Fonte: ANA [15] adaptado

Tab. 3 – Rio Araguaia – Ilha do Bananal

Estação	Código Estação
Barreira da Cruz	26800000
Fazenda Dois Rios	26713000
Fazenda Coprape	26711000

Fonte: ANA [15] adaptado

Tab. 4 – Rio das Mortes – Nova Xavantina

Estação	Código Estação
Antônio do Leverguer	26300000
Trecho Médio	26200000
Xavantina	26100000

Fonte: ANA [15] adaptado

Tab. 5 – Rio Itacaúnas – Parauapeba

Estação	Código Estação
Fazenda Alegria	9100000

Fonte: ANA [15] adaptado

Com as estações definidas conforme apresentadas nas **tabelas de 1 a 5**, foi possível coletar os dados de nível médio diário para todos os anos disponíveis nas séries históricas das estações. Teve-se o cuidado de obter somente os níveis d'água consistidos, os quais representam dados tratados pela ANA, dando mais confiabilidade e segurança quanto aos resultados obtidos nesse estudo.

As estações fluviométricas Fazenda Dois Rios (Código 26713000) e Fazenda Coprape (Código 26711000) do Trecho Ilha do Bananal não apresentaram níveis d'água médios diários no Sistema de Informações Hidrometeorológicas da Agência Nacional de Águas. Portanto, não foi possível realizar os estudos para essas estações.

3.1 Série anual de níveis d'água com permanência de 90%

Para cada ano com dados, utilizando os valores médios diários, foi traçada uma curva de permanência e se obteve o valor de nível d'água anual com permanência de 90% (H90%). Esse valor representa o nível existente no curso d'água em 90% do tempo, isto é, um nível pequeno. O risco assumido é de que há possibilidade de 10% do mesmo ser inferior a um valor estimado, e neste caso, haveria problemas com disponibilidade de calado para a hidrovia. Uma observação adicional pode ser feita. Quanto menor o intervalo de análise dos dados (dados diários, mensais ou anuais) mais segura será a interpretação da curva de permanência.

O percentual de 90% foi usado em virtude de ser uma referência utilizada em recursos hídricos e na legislação ambiental.

O procedimento para obtenção da curva de permanência foi baseado na obtenção de classes de frequência.

Para definição dos valores limites dos intervalos de observação, foram calculados o número de intervalos

ou classes no qual os dados serão separados. As equações 1 e 2 determinam os valores extremos para o número de classes. Estas são baseadas na quantidade de dados N da série analisada.

$$N^{\circ} \text{ mínimo de classes} = [10+1,33 \text{ Ln } N] \quad (1)$$

$$N^{\circ} \text{ máximo de classes} = [10 \cdot \text{Log}_{10} N] \quad (2)$$

Onde N é o número de valores da série diária.

As curvas de permanência são construídas a partir dos dados com frequência simples, que são somadas cumulativamente no sentido crescente (curva de permanência de níveis d'água crescente) ou decrescente das grandezas (curva de permanência de níveis d'água decrescente). A curva crescente contínua é traçada pelos limites superiores dos intervalos e a curva decrescente contínua é traçada pelos limites inferiores.

Como exemplo a figura 2 apresenta a curva de permanência de cotas médias diárias do ano de 1970 da série histórica da estação Fluviométrica de Xambioá (Código – 28300000). A partir da curva ou de forma mais precisa dos dados acumulados que geraram a curva observa-se que a cota ou nível d'água com permanência de 90% no ano de 1970 da estação Fluviométrica de Xambioá (Código – 28300000) foi de 179 cm.

Repetindo o procedimento de determinação nível d'água anual com permanência de 90%, pode-se obter para a estação fluviométrica uma série histórica anual de níveis d'água anual com permanência de 90%. A tabela 6 apresenta como exemplo a série da estação Fluviométrica de Xambioá (Código – 28300000).

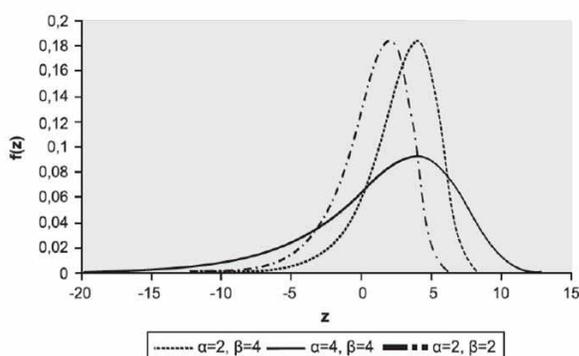


Fig. 2 – Curva de permanência de 1970 da série de cotas da estação de Xambioá (Código – 28300000).

Tab. 6 – Série de níveis anuais com permanência de 90% - Estação de Xambioá (Código – 28300000)

Ano	Nível com permanência de 90% (cm)	Ano	Nível com permanência de 90% (cm)	Ano	Nível com permanência de 90% (cm)
1970	179	1985	234	2000	229
1971	176	1986	220	2001	187
1972	175	1987	207	2002	201
1973	192	1988	218	2003	204
1974	240	1989	229	2004	215
1975	180	1990	224	2005	192
1976	196	1991	239	2006	210
1977	229	1992	232	2007	169
1978	236	1993	223	2008	185
1979	256	1994	214	2009	223
1980	240	1995	223	2010	165
1981	223	1996	208	2011	184
1982	267	1997	252	2012	179
1983	236	1998	186	2013	195
1984	226	1999	192	-	-

3.2 Determinação do tirante com permanência de 90% para um TR de 10 anos

Para determinar o tirante com permanência de 90% na estação para um tempo de recorrência de 10 anos aplicou-se aos dados da série anual de tirantes ou níveis d'água com permanência de 90% os métodos estatísticos de Gumbel amostra para mínimos e de Weibull. Pois pertencem à mesma família de distribuição e são úteis para representar as distribuições mínimas anuais [16].

Os métodos estatísticos são os mais apropriados para determinação de valores extremos de nível d'água, entretanto sua eficácia depende da quantidade de dados disponíveis em uma série histórica que servirá como amostra do universo e da estabilidade das características principais do regime do curso d'água. Isto é, entre o momento da coleta e o momento da utilização dos dados históricos o rio não deve ter sofrido nenhuma modificação hidrológica importante como desvio, retificação, construção de barragem, urbanização das margens, etc. Além disso, deve-se trabalhar com séries históricas com dados confiáveis sem falhas. Desta forma, os anos com falhas foram excluídos das séries e optou-se por utilizar os dados consistidos disponibilizados pela ANA.

Em estudos de variáveis hidrológicas máximas

define-se Tempo de Recorrência ou Período de Retorno (TR) como o tempo médio em anos que evento é igualado ou superado pelo menos uma vez. Assim, o período de retorno representa o inverso da frequência (F) com que um evento (X, Xi) pode ser igualado ou superado, ou seja, reflete a probabilidade (P) com que uma dada variável hidrológica possa ser igualada ou superada, pelo menos uma vez, em um ano qualquer. Ao se ajustar uma distribuição de probabilidades aos dados de frequência de uma série histórica, utiliza-se a probabilidade de excedência para estimar um tempo de recorrência, que é obtido em anos. Este é expresso pela **equação 3**:

$$\frac{1}{F(X \geq Xi)} \cong \frac{1}{P(X \geq Xi)} \quad (3)$$

No entanto, quando o objeto de estudo consiste de uma série histórica de dados hidrológicos mínimos, o tempo de recorrência a ser estimado também está associado à probabilidade com que o valor mínimo considerado pode ser inferior ao esperado, ou seja:

$$\frac{1}{F(X \leq Xi)} \cong \frac{1}{P(X \leq Xi)} \quad (4)$$

Assim, ao se ajustar uma distribuição de probabilidades aos dados de frequência de uma série histórica, utiliza-se a probabilidade de não excedência para estimar um tempo de recorrência. No problema proposto está sendo buscado o nível d'água com permanência de 90% que não é igualado ou superado pelo menos uma vez a cada dez anos em média.

Quanto maior o número de dados da amostra utilizada para os cálculos, mais representativa esta amostra é do universo e melhor a inferência estatística realizada.

Em problemas de variáveis discretas, é possível responder à pergunta: qual a probabilidade de um número qualquer ser sorteado (evento X) dentro de um espaço amostral finito qualquer, constituído por N números, sendo este um evento aleatório. No entanto, na hidrologia, em grande parte das vezes, o que é buscado é avaliar qual a possibilidade de um determinado evento ser maior ou igual (ou menor ou igual) a um dado valor Xi e isto remete a necessidade de uso de uma variável contínua. Assim é preciso ajustar aos dados discretos

uma curva de distribuição de probabilidade contínua. Além disso, os dados da amostra nem sempre possuem uma frequência de ocorrência compatível com o tempo de recorrência de projeto.

Desta forma, a aplicação dos métodos estatísticos parte de uma amostra definida pela série de dados de nível d'água e supõe que esses dados se ajustem com uma precisão a uma curva de distribuições de probabilidades contínua. Como essa curva é contínua, se pode determinar valores extremos para diversos tempos de recorrência através das equações ou tabelas derivadas dessas equações que definem as curvas contínuas de distribuição de probabilidade. As curvas de distribuição de probabilidades mais utilizadas no cálculo de eventos hidrológicos extremos máximos são a Log Normal, a Log Pearson Tipo III e a assintótica dos extremos Tipo I ou de Gumbel (de máxima). O cálculo de tirantes para hidrovias e de vazões ecológicas são problemas hidrológicos de busca de valor mínimo e assim são usadas as curvas de distribuição de probabilidades de eventos hidrológicos extremos mínimos de Gumbel e de Weibull. Estas serão as curvas utilizadas nesse estudo.

Alguns conceitos estatísticos são utilizados nas metodologias de cálculo. Média (Xm) é a média aritmética do conjunto de dados expressa por:

$$Xm \cong \frac{\sum Xi}{n} \quad (5)$$

Onde: Xi = valor do evento i e n = número total de eventos.

A variância de uma variável aleatória ou processo estocástico é uma medida da sua dispersão estatística, indicando "o quão longe" em geral os seus valores se encontram do valor esperado. Dentro de uma amostra a variância med = -1,1396 é a dispersão em relação à média. Já o desvio padrão é definido como sendo a raiz quadrada da variância. A **equação 6** mostra a expressão de cálculo do desvio padrão (S).

$$S = -\frac{\sqrt{\sum(Xi-Xm)}}{n-1} \text{ ou } S = -\frac{\sqrt{\sum(Xi)^2-n(Xm)^2}}{n-1} \quad (6)$$

O coeficiente de variação (CV) denota a relação entre o desvio padrão e a média.

$$CV = \frac{S}{X_m} \quad (7)$$

A assimetria é um parâmetro importante na medida em que avalia a forma como os dados estão distribuídos em relação à média. Para que os dados apresentem distribuição normal, a assimetria deve ser próxima ou igual a zero. Nessa situação, a média, a moda e a mediana são iguais. Contudo, quando este valor for distante de zero, apresentará um padrão de distribuição com a maior quantidade de dados à esquerda (assimetria positiva) ou à direita (assimetria negativa).

O ajuste de uma distribuição de probabilidades é conduzido com base em 2 ou 3 parâmetros. A estimativa destes parâmetros é feita com base na Inferência Estatística a partir da amostra existente de dados. A partir deste conceito Ven Te Chow propôs uma equação geral que pode ser aplicada a todas as curvas de distribuição de probabilidades.

$$X_T = X_m + k_T S_x \quad (8)$$

Onde: X_T é a variável de interesse (no caso nível d'água) que se deseja calcular para um período de retorno TR; X_m é a média amostral; S_x é o desvio padrão amostral; K_T é um fator de frequência que depende do tempo de recorrência e eventualmente da assimetria e é tabelado por curva de distribuição de probabilidades.

3.3 A distribuição e o método de Gumbel (para mínimos)

Esse método supõe que a amostra definida pela série de dados de nível d'água se ajustam com uma precisão a curva de distribuições assintótica de extremos do Tipo I ou de Gumbel. A distribuição de valores extremos do Tipo I recebeu as seguintes outras denominações: distribuição de Gumbel, Fisher-Tippett tipo I e dupla exponencial.

Em 1928, Fisher e Tippett, tomando de vários conjuntos de muitas amostras o maior valor de cada conjunto, mostraram que a distribuição dos valores extremos é independente da distribuição original e se comporta como função limite. Gumbel, em 1945,

sugeriu que essa distribuição de valores extremos seria apropriada para a análise de frequência valores hidrológicos extremos, desde que a série fosse anual, isto é, cada nível da série de valores extremos fosse o nível extremo de uma amostra de 365 possibilidades (valor extremo do ano).

No caso de valores máximos, a função densidade da distribuição de Gumbel é dada por:

$$f(y) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{y-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (9)$$

Onde: α representa o parâmetro de escala e β o parâmetro de posição; de fato, β também é a moda de Y .

A distribuição de Gumbel (máximos) é a distribuição de valores extremos mais usada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações na determinação de relações intensidade duração-frequência de precipitações intensas e estudos de vazões de enchentes.

Já no caso de valores mínimos, que é o objetivo deste estudo, a função densidade da distribuição de Gumbel é dada por:

$$f(z) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{z-\beta}{\alpha} - \exp\left(\frac{z-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (10)$$

Apoiando-se no argumento de Fisher e Tippett, Gumbel sugeriu que a probabilidade de ocorrência de uma variável de magnitude menor ou igual a um dado valor x (probabilidade de não excedência) pode ser expressa por:

$$F(Z \geq z) = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{z-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (11)$$

para $-\infty < Z < \infty, -\infty < \beta < \infty, e \alpha > 0$

Onde: α representa o parâmetro de escala e β o parâmetro de posição; de fato, β também é a moda de Z .

A média ou valor esperado, a variância e o coeficiente de assimetria de Z são, respectivamente:

$$Z_m = \beta - 0,05772\alpha \quad (12)$$

$$Var(z) = \sigma^2 = \frac{\pi^2 \pi \alpha^2}{6} \quad (13)$$

$$\gamma = -1,1396 \quad (14)$$

Observe, portanto, que a distribuição Gumbel (mínimos) possui um coeficiente de assimetria negativo e constante. A **figura 3** ilustra a função densidade Gumbel, para alguns valores específicos dos parâmetros α e β .

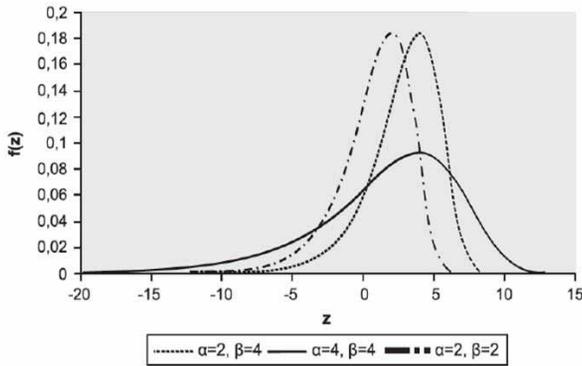


Fig. 3 – Função densidade Gumbel, para alguns valores específicos dos parâmetros α e β .

A determinação dos valores mínimos em função do tempo de recorrência é realizada através da expressão da inversa da FAP de Gumbel (mínimos), ou função de quantis, expressa por:

$$\begin{aligned} Z(F) &= \beta + \alpha \ln[-\ln(1-F)] \quad \text{ou} \\ Z(TR) &= \beta + \alpha \ln[-\ln(1 - \frac{1}{TR})] \end{aligned} \quad (15)$$

Onde F é a frequência e TR o tempo de recorrência.

O ajuste dos parâmetros α e β para os valores da amostra (**equações 12 e 13**), conduz a **equação 16**:

$$Z(TR) = Z_m + \sigma_z [0,451 + 0,7797 \ln[-\ln(1 - \frac{1}{TR})]] \quad (16)$$

Desta forma, poder-se-ia aplicar a equação de Ven Te Chow (**equação 8**) com o valor do fator de frequência K_t dado por:

$$\begin{aligned} K_T &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} [0,577 + \ln \ln(1 - \frac{1}{TR})] \quad \text{ou} \\ K_T &= 0,451 + 0,7797 + \ln \ln(1 - \frac{1}{TR}) \end{aligned} \quad (17)$$

Após calcular a média e o desvio padrão da série histórica de nível d'água com permanência de 90% para cada estação fluviométrica, e aplicar a **equação**

16 é possível determinar o tirante mínimo relacionado ao tempo de recorrência.

3.4 A distribuição e o método de Weibull (para mínimos)

Esse método supõe que a amostra definida pela série de dados de nível d'água se ajustam com uma precisão a curva de distribuições assintótica de extremos do Tipo III ou de Weibull para valores mínimos. A distribuição de Weibull refere-se à forma assintótica limite para um conjunto de N variáveis aleatórias originais $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, independentes e igualmente distribuídas conforme um modelo $F_X(x)$ de cauda inferior limitada. A distribuição de extremos mínimos do Tipo III recebeu a denominação de distribuição de Weibull por ter sido usada pela primeira vez pelo engenheiro sueco Waloddi Weibull.

No caso de valores máximos, a função densidade da distribuição de Weibull é dada por:

$$f_Z(z) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{z}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{z}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (18)$$

Onde: α representa o parâmetro de forma e β o parâmetro de escala. Para $\alpha = 1$, a distribuição de Weibull é a exponencial com parâmetro de escala β .

A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Weibull é:

$$F(Z \geq z) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{z}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (19)$$

para $Z \geq 0, \beta \geq 0$ e $\alpha > 0$

Onde: α representa o parâmetro de forma e β o parâmetro de escala.

A média ou valor esperado, a variância, o coeficiente de variação e o coeficiente de assimetria de Z são, respectivamente:

$$Z_m = \beta \text{Gama}\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (20)$$

$$\text{Var}(Z) = \sigma_z^2 = \beta^2 \left[\text{Gama}\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \text{Gama}^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right] \quad (21)$$

$$\gamma = \frac{Gama\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right) - 3Gama\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)Gama\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) + 2Gama^2\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)}{\sqrt{[Gama\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - Gama^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)]^3}} \quad (22)$$

$$CV = \frac{\sqrt{Gama\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - Gama^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}}{Gama\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (23)$$

Onde: $A(\alpha) = Gama(1+1/\alpha)$ e $B(\alpha) = Gama(1+2/\alpha)$. A **figura 4** ilustra a função densidade Weibull, para alguns valores específicos dos parâmetros α e β .

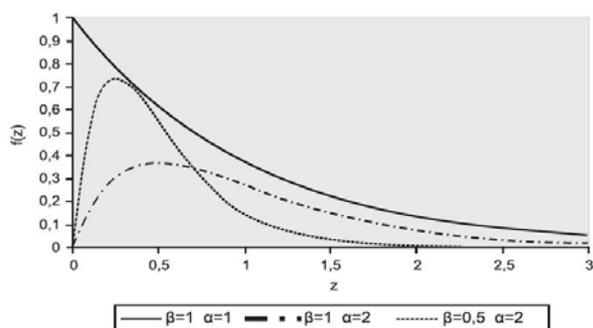


Fig. 4 – Função densidade Weibull, para alguns valores específicos dos parâmetros α e β .

Conhecidos os valores da média, da variância e do coeficiente de variação, os valores de α , β , $A(\alpha)$ e $B(\alpha)$ podem ser ajustados a amostra através da solução do sistema composto pelas **equações 20, 21 e 23**.

A determinação dos valores mínimos em função do tempo de recorrência é realizada através da expressão da inversa da FAP de Weibull (mínimos), ou função de quantis, expressa por:

$$\text{Ou} \quad z(F) = \beta[-\ln(1 - F)]^{1/\alpha} \quad (24)$$

$$z(TR) = \beta[-\ln(1 - 1/TR)]^{1/\alpha}$$

onde F é a frequência e TR o tempo de recorrência.

4. Resultados e discussões

Conforme metodologia descrita, foram determinados os tirantes mínimos com permanência

de 90% para todas as estações fluviométricas com dados disponíveis para a hidrovia Tocantins e Araguaia.

A **figura 5** mostra o gráfico e a equação resultante do ajuste dos dados do tirante mínimo para a estação fluviométrica de Xambioá aos tempos de retorno, obtidos da série de 44 anos, pela distribuição de Gumbel para mínimos. Os resultados da **tabela 7** e **figura 6**, mostram que o tirante mínimo anual com período de retorno de 10 anos (Z_{10}) foi de 178,21 cm.

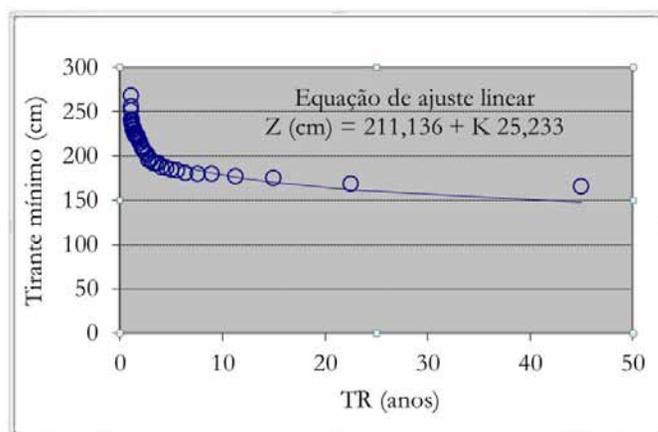


Fig. 5 – Tirante em função de TR - ajuste por Gumbel para mínimos para a estação fluviométrica Xambioá.

Tab. 7 – Previsão de tirante mínimo para estação fluviométrica de Xambioá para a distribuição de Gumbel

Parâmetros	Resultados			
TR (anos)	2	5	10	25
Z (cm)	215,28	192,98	178,21	159,56
P (%)	50	20	10	4

P = probabilidade de não-excedência do tirante mínimo (%).

A **figura 6** mostra o gráfico e a equação resultante do ajuste dos dados do tirante mínimo para a estação fluviométrica de Xambioá aos tempos de retorno, obtidos da série de 44 anos, pela distribuição de Weibull. Os resultados da **tabela 8** e **figura 6**, mostram que o tirante mínimo anual com período de retorno de 10 anos (Z_{10}) foi de 177,40 cm.

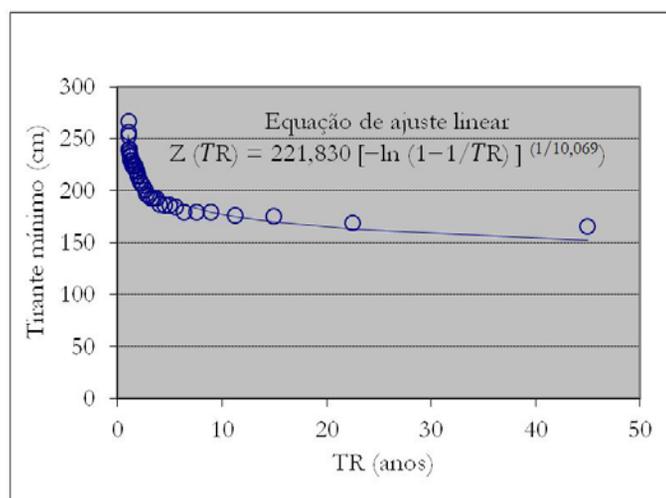


Fig. 6 – Tirante em função de TR - ajuste por Weibull para a estação fluviométrica Xambioá.

Tab. 8 – Previsão de tirante mínimo para estação fluviométrica de Xambioá para a distribuição de Weibull

Parâmetros	Resultados			
TR (anos)	2	5	10	25
Z (cm)	213,90	191,13	177,40	161,46
P (%)	2	5	10	25

P = probabilidade de não-excedência do tirante mínimo (%)

A seguir serão apresentados em tabelas os resultados de níveis mínimos de todas estações da Hidrovia do Tocantins e Araguaia comparando os métodos de cálculo entre Gumbel para mínimos e Weibull por segmento da hidrovia. **tabela 9 a 13.**

Tab. 9 – Tirante mínimos calculados para o segmento Rio Tocantins até Peixe

Estação	Resultados		Nível d'água adotado (cm)
	Método de Gumbel	Método de Weibull	
Nazaré dos Patos	187,56	186,60	186,60
Tucuruí	134,71	133,40	133,40
Itupiranga	165,37	167,46	165,37
Marabá	162,40	160,91	160,91
Descarreto	77,57	77,26	77,26
Tocantinópolis	26,57	26,91	26,57
Tupiratins	57,99	58,32	57,99
Miracema do Tocantins	44,01	43,70	43,70
Peixe	101,67	102,53	101,67

Tab. 10 – Tirante mínimos calculados para o segmento Rio Araguaia até Barra das Garças

Estação	Resultados		Nível d'água adotado (cm)
	Método de Gumbel p/ mínimos	Método de Weibull	
Araguatins	252,96	252,79	252,79
Xambioá	178,21	177,40	177,40
Conceição do Araguaia	201,03	200,46	200,46
Araguacema	229,83	211,24	211,24
São Félix do Araguaia	270,06	269,27	269,27
Luiz Alves	263,02	262,04	262,04
Bandeirantes	356,23	355,74	355,74
Aruaná	101,33	100,53	100,53
Araguaiana	94,87	94,23	94,23
Barra das Garças	34,94	36,99	34,94

Tab. 11 – Tirante mínimos calculados para o segmento Rio Das Mortes até Xavantina

Estação	Resultados		Nível d'água adotado (cm)
	Método de Gumbel p/ mínimos	Método de Weibull	
Santo Antônio do Levergers	178,30	177,46	177,46
Trecho Médio	238,15	237,87	237,87
Xavantina	38,83	38,49	38,49

Tab. 12 – Tirante mínimos calculados para o segmento Rio Itacaiunas - Foz Parauapeba

Estação	Resultados		Nível d'água adotado (cm)
	Método de Gumbel p/ mínimos	Método de Weibull	
Fazenda Alegria	252,72	250,77	250,77

Tab. 13 – Tirante mínimos calculados para o segmento Rio Araguaia - Ilha do Bananal

Estação	Resultados		Nível d'água adotado (cm)
	Método de Gumbel p/ mínimos	Método de Weibull	
Barreira da Cruz	43,80	44,27	43,80

As estações fluviométricas Fazenda Dois Rios (Código 26713000) e Fazenda Coprape (Código 26711000) do Trecho Ilha do bananal não apresentaram séries históricas de dados de níveis d'água médios diários no Sistema de Informações Hidrometeorológicas da ANA, para essas estações não foram possíveis fazer a análise do tirante mínimo.

De todas as estações estudadas, somente a estação fluviométrica Barreira da Cruz que apresentou registro de série histórica de 23 anos, enquanto que as outras estações possuíam registro variando de 32 a 56 anos, sendo a estação de Tocantinópolis a que apresentou maior número de eventos registrados.

De forma conservadora para os cálculos de níveis a serem utilizados na determinação dos volumes de dragagem, recomenda-se para estação o tirante com permanência de 90% para um TR de 10 anos adotar o menor dos valores calculados pelos dois métodos. Sendo que apenas 25% dos resultados o método de Gumbel apresentou cotas mínimas menores para a hidrovia do Tocantins e Araguaia.

5. Conclusão

A metodologia é perfeitamente aplicável com bons resultados. Como o número de eventos das estações fluviométricas variaram de 23 a 56 anos e quanto

maior o número de dados da amostra utilizada para os cálculos, mais representativa esta amostra é do universo e melhor a inferência estatística realizada, pode-se considerar que os resultados obtidos são representativos, e além disso os métodos de cálculo também se mostraram adequados para esse tipo de cálculo de tirantes mínimos.

Das vinte e quatro estações fluviométricas analisadas, somente seis foram considerados como nível d'água mínimo os resultados calculados pelo método de Gumbel amostra infinita.

Para as outras 18 estações o Método de Weibull apresentou resultados menores, e mesmo assim a diferença foi muito pequena variando em torno de 0,57% a 1,27%, praticamente desprezível, ou seja, os resultados mostram que a distribuição de Weibull e Gumbel apresentam probabilidade de ocorrerem níveis d'água com valores muito próximos, praticamente semelhantes.

Referências bibliográficas

- [1] ANA - Agência Nacional de Águas, Plano estratégico de recursos hídricos da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia. Brasília, 2009. Disponível em: <http://semarh.to.gov.br/conteudo/relatorio-sintese-do-plano-estrategico-da-bacia-hidrografica-dos-rios-tocantins-e-araguaia/414>. Acessado em 18 jun. 2015.
- [2] CNT - Confederação Nacional de Transporte, Plano CNT de Transporte e Logística. 2011. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/.../PlanoCNTdeLog201>. Acessado em 18 jun. 2015.
- [3] Tucci, C E M. Regionalização de vazões; Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002, cap. 8.
- [4] Gottschalk, L.; YU, K.; Leblais, E.; Xiong L. Statistics of low flow: Theoretical derivation of the distribution of minimum streamflow series. *Journal of Hydrology*, Vol.481, pp.204-219, 2013, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.047.
- [5] Finkler, N. R.; Mendes, L. A.; Schneider, E. H. M.; Bortolin, T. A.; Schneider, V. E.; Análise de funções de distribuição de probabilidades na determinação de vazão mínima sazonal; XXI Simpósio de Recursos Hídricos, Brasília, Brasil, 2015.
- [6] Leme, E. J. K.; Chaudhry, F. H. Vazão Mínima do Vale Médio do Rio Jaguari Mirim. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 10, n. 4, p. 127-136, out./dez. 2005, doi: 10.21168/rbrh.v10n4.p127-136.
- [7] Kankam-Yeboah, K.; Logah, F.; Amisigo, B.; Bekoe, E.; Ofori, D.; Akudago. Low Flow Analysis Of The Black Volta River At Lawra In Ghana. *Journal of Environmental Hydrology*, Vol.21(2), pp.1-16, 2013. Disponível em: <http://www.hydroweb.com/protect/pubs /jeh/ jeh2013/aku.pdf>. Acessado em: 25 fev. 2016.
- [8] Detzel, D. H. M.; Fernandes, C. V. S.; Mine, M. R. M.; Estacionariedade na Construção de Curvas de Permanência com Vistas à Outorga de Recursos Hídricos (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p80-87>
- [9] Vestena, L. R.; Oliveira, É. D.; Cunha, M. C. Da; Thomaz, E. L.; Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras, Guarapuava-PR, (2012) doi: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.840>
- [10] Cruz, J. C.; Tucci, C. E. M.; Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência (2008), doi: 10.21168/rbrh.v13n1.p111-124.
- [11] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes; Hidrovia do Tocantins Araguaia; 27/12/2018; <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/hidrovia-do-tocantins-araguaia>, acessada em setembro de 2020.
- [12] CODOMAR – Companhia de Docas do Maranhão. Edital nº 3/2013. Disponível em: <http://www.codomar.gov>

- br /sistem/biblioteca/ 20131126172525.pdf. Acessado em: 17 dez. 2014.
- [13] Projeto Brasil Das Águas, Região hidrográfica do Tocantins-Araguaia. Disponível em: <http://brasildasaguas.com.br/educacional/regioes-hidrograficas/regiao-hidrografica-do-tocantins/>. Acessado em: 07 ago. 2015.
- [14] ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Plano Nacional de Integração Hidroviária – Bacia do Tocantins Araguaia. 2013. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH/BaciaTocantinsAraguaia>. Acessado em 07 ago. 2015.
- [15] ANA - Agencia Nacional de Águas, Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www2.snirh.gov.br/home/webmap/viewer.html?webmap=b517f199e5624a729aa85bca15310229>. Acessado em 17 dez. 2014
- [16] Clarke, R. T.; Hidrologia Ciência e Aplicação; Editora UFGRS, 2009, cap. 17.