

Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

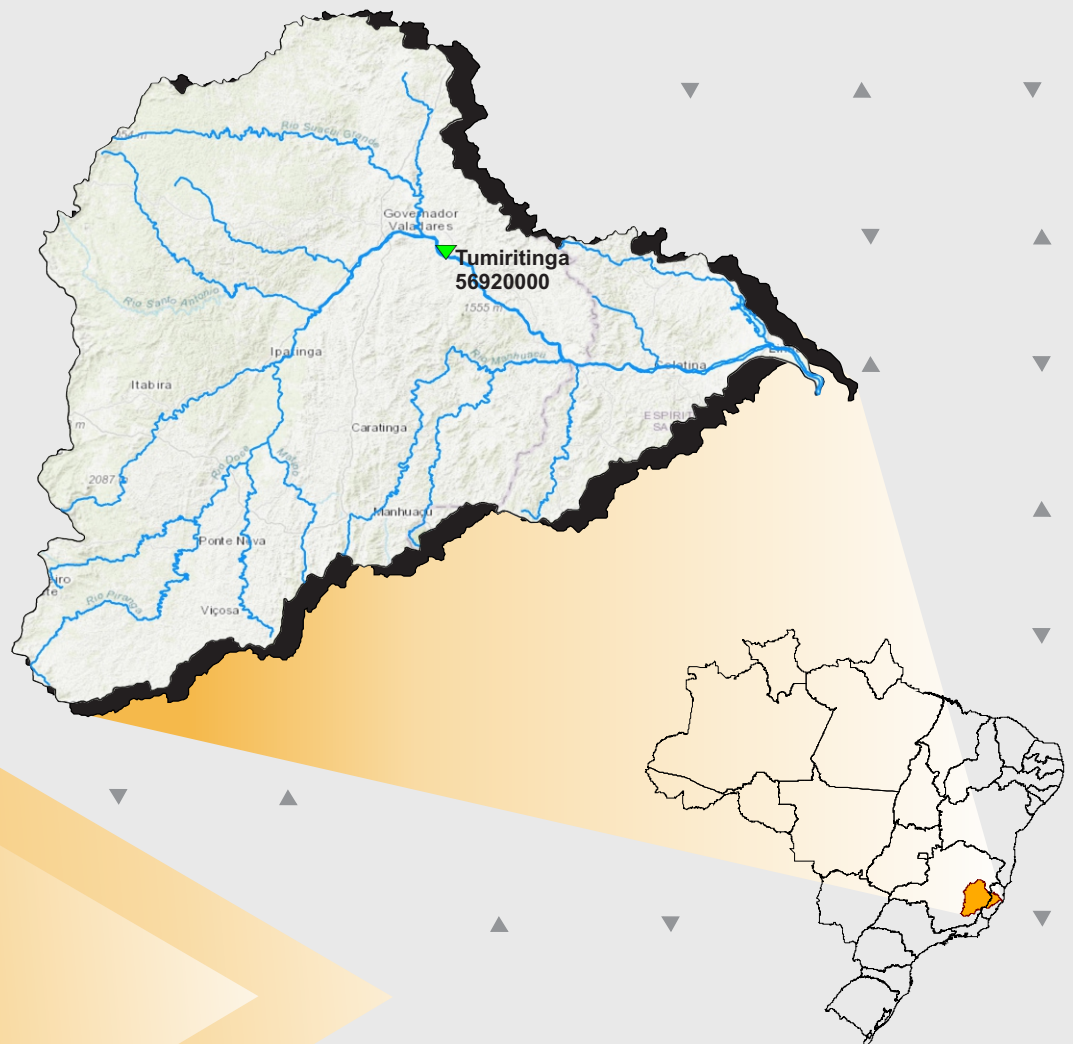
Análise de Frequências de Vazões dos Sistemas de Alerta

Sistema de Alerta: Bacia do Rio Doce

Rio Doce em Tumiritinga

Código 56920000

Município Atendido: Tumiritinga - MG e Galiléia - MG



2022

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL
DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA
RESIDÊNCIA DE FORTALEZA

PROGRAMA GESTÃO DE RISCOS E DE DESASTRES
AÇÃO LEVANTAMENTOS, ESTUDOS, PREVISÃO E ALERTA DE EVENTOS
HIDROLÓGICOS CRÍTICOS

**PROJETO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS**

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES DOS SISTEMAS DE ALERTA

Sistema de Alerta: Bacia do Rio Doce

Rio: Doce

Estação Fluviométrica: Tumiritinga

Código: 56920000

Municípios Atendidos: Tumiritinga – MG e Galiléia - MG

Paula Kristhina Cordeiro Freire

Eber José de Andrade Pinto



FORTALEZA

2022

PROGRAMA GESTÃO DE RISCOS E DE DESASTRES
AÇÃO LEVANTAMENTOS, ESTUDOS, PREVISÃO E ALERTA DE
EVENTOS HIDROLÓGICOS CRÍTICOS

PROJETO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES
NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES DOS SISTEMAS DE ALERTA

Executado pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM
Residência de Fortaleza

Copyright @ 2022 CPRM – Residência de Fortaleza
Rua Rodrigues Júnior, 840 - Centro
Fortaleza - CE
CEP: 60.060-000
Telefone: (85) 3878-0200
Fax: (85) 3878-0240
<http://www.cprm.gov.br>

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

F866 Freire, Paula Krishthina Cordeiro
Análise de frequência de vazões dos sistemas de alerta:
Sistema de alerta Bacia do Rio Doce, Rio Doce, estação
fluviométrica Tumiritinga, código 56920000, municípios atendidos
Tumiritinga - MG e Galiléia – MG / Paula Krishthina Cordeiro
Freire; Eber José de Andrade Pinto. – Fortaleza: CPRM, 2022.
1 recurso eletrônico: PDF

Título da capa: Projeto de Regionalização de Vazões nas
Bacias Hidrográficas Brasileiras.
Programa Gestão de Riscos e de Desastres.
Ação Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta de Eventos
Hidrológicos Críticos.
ISBN 978-65-5664-322-9

1.Hidrologia – Brasil. 2. Regionalização de Vazões. 3.
Análise de Frequência Local. I. Pinto, Eber José de Andrade. II.
Título. III. Título da capa: Projeto de Regionalização de Vazões
nas Bacias Hidrográficas Brasileiras.

CDD 551.48

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Giovania Freire CRB-3/911

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM

É permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

MINISTRO DE ESTADO

Adolfo Sachsida

SECRETÁRIO EXECUTIVO

Hailton Madureira de Almeida

SECRETÁRIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

Lília Mascarenhas Sant'Agostino

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB/CPRM

CONSELHO DE ADMINISTRAÇÃO

Presidente

Lília Mascarenhas Sant'Agostino

Vice-Presidente

Cassiano de Souza Alves - Interino

Conselheiros

Antônio Simões Brando Júnior

Cassio Roberto da Silva

Fernando Antônio Freitas Lins

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente Interino

Cassiano de Souza Alves

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Márcio José Remédio

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

RESIDÊNCIA DE FORTALEZA

Maria da Guia Lima
Chefe da Residência

Maria Dulcinéa Madureira Rolim Bessa
Coordenador Executivo REFO

Luiz da Silva Coelho
Assistente de Produção de Hidrologia e Gestão Territorial

Edney Smith de Moraes Palheta
Assistente de Produção de Geologia e Recursos Minerais

Iris Pereira Gomes
Assistente de Produção de Infraestrutura Geocientífica

Alzira Barros Cardoso
Assistente de Administração e Finanças

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NAS BACIAS BRASILEIRAS

Departamento de Hidrologia
Frederico Cláudio Peixinho

Divisão de Hidrologia Aplicada
Adriana Dantas Medeiros
Achiles Monteiro (*In memoriam*)

Coordenação Executiva do DEHID
Projeto de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras
Eber José de Andrade Pinto

Equipe Executora

Denise Christina de Rezende Melo – SUREG/GO
Francisco Fernando Noronha Marcuzzo – SUREG/PA
Múcio Valença Virões – SUREG/RE
Myrla de Souza Batista Vieira – SEDE
Paula Kristhina Cordeiro Freire – REFO

Sistema de Informações Geográficas e Mapa

Ivete Souza do Nascimento – SUREG/BH

APRESENTAÇÃO

O projeto Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras é uma iniciativa dentro do programa de Gestão de Riscos e de Desastres que tem por objetivo ampliar o conhecimento sobre a disponibilidade hídrica no território nacional, bem como, sobre a frequência de ocorrência das vazões e/ou das cotas.

O conhecimento da disponibilidade de água doce de uma bacia hidrográfica é o principal instrumento de gestão de recursos hídricos, com base no qual pode ser concedido de forma adequada e sustentável o direito de uso deste bem, seja para fins energéticos, de irrigação, de abastecimento e outros. Além disto, o conhecimento da frequência é uma informação útil para o planejamento nos setores elétrico, agrícola, abastecimento público e na adoção de políticas públicas.

Dentre os objetivos da ação dos Levantamentos, Estudos, Previsão e Alerta de Eventos Hidrológicos Críticos, destaca-se a realização de estudos de análise de frequência local das séries históricas de vazões máximas ou cotas máximas das estações fluviométricas.

A análise de frequência possibilita a determinação das vazões máximas ou cotas máximas associadas a uma probabilidade de ser igualada ou superada. Os resultados da análise, ou seja, os quantis serão utilizados como valores de projeto no dimensionamento de diversas estruturas hidráulicas ou de aproveitamento dos recursos hídricos. Esta análise estatística também pode ser utilizada de forma inversa, ou seja, estimar a frequência de um evento de cheia ocorrido, definindo se o evento foi raro ou ordinário. Tipo de informação que é bastante útil para sistemas de alerta de cheias que poderão divulgar, além das previsões e dos valores observados, a raridade do evento acompanhado.

Este estudo apresenta os resultados da análise de frequência das vazões máximas observadas no Rio Doce especificamente na estação fluviométrica Tumiritinga, código 56920000. Esta estação fluviométrica faz parte do Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) da bacia do Rio Doce e constitui um ponto de acompanhamento das vazões e cotas nesta região, no Estado de Minas Gerais.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	01
2 – METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL.....	09
3 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL.....	11
4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	13
5 – REFERÊNCIAS.....	15
ANEXO I.....	17
ANEXO II.....	21
ANEXO III.....	30

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 – Localização das estações fluviométricas do SACE Rio Doce
Figura 02 – Localização dos municípios beneficiados pelo SACE Rio Doce
Figura 03 – Localização da estação fluviométrica de Tumiritinga
Figura 04 – Perfil da seção transversal do Rio Doce da seção de réguas na estação de Tumiritinga
Figura 05 - Frequência de cotas máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)
Figura 06 – Ajuste das distribuições empírica e teórica

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01 – Vazões em m^3/s , associadas a diferentes tempos de retorno

ANEXOS

- Anexo I – Ficha Descritiva da Estação Fluviométrica
Anexo II – Distribuições Candidatas
Anexo III – Série de Dados Utilizados – Cotas e Vazões máximas por ano hidrológico, Curvas-chave, Vídeos na INTERNET registrando alguns grandes eventos de cheia e Estatísticas da Série

1 – INTRODUÇÃO

A bacia do Rio Doce está situada na região sudeste, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste e possui uma área de drenagem de 83.400 km², sendo 86% dentro do Estado de Minas Gerais e 14% no Estado do Espírito Santo e abrange um total de 230 municípios.

As nascentes do Rio Doce situam-se no Estado de Minas Gerais, nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço, sendo que suas águas percorrem cerca de 850 km, até atingir o Oceano Atlântico, junto ao povoado de Regência, no Estado do Espírito Santo. Existem dois rios de dominialidade federal na bacia do Rio Doce: o Rio Doce e o Rio José Pedro, afluente do Rio Manhuaçu (PLANO..., 2010).

A bacia limita-se ao sul com a bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, a sudoeste com a bacia do Rio Grande, a oeste com a bacia do Rio São Francisco, ao norte e noroeste com a bacia do Rio Jequitinhonha, e bacias do litoral sul do Espírito Santo e a nordeste com as bacias do litoral norte do Espírito Santo. Os principais afluentes do Rio Doce pela margem esquerda são os Rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçuí Grande, em Minas Gerais; São José e Pancas no Espírito Santo. Já pela margem direita são os Rios Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté e Manhuaçu em Minas Gerais; Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce no Espírito Santo (PLANO..., 2010).

As inundações que assolam a região têm sua origem agravada por ações antrópicas como o desmatamento e o manejo inadequado do solo e o assoreamento advindo de resíduos minerais, industriais e domésticos. As áreas próximas ao leito principal, denominadas de planície de inundação, vêm sendo sistematicamente ocupadas pela população, agravando os impactos ocasionados pelas enchentes (CPRM, 2003). Ao longo da história foi comum o registro de eventos de cheias com perdas de vidas humanas e de grandes danos materiais. Em fevereiro de 1979 houve uma grande cheia que motivou a instalação pelo extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) de uma rede telemétrica com transmissão de dados hidrometeorológicos via telefone. Na década de 90 também foram instaladas na bacia algumas estações com transmissão via satélite. Entretanto, mesmo com a rede telemétrica já instalada não foi possível implantar o sistema de alerta de cheias. Somente após a ocorrência de outra grande cheia na bacia, em janeiro de 1997, foi viável o estabelecimento do sistema de alerta de cheias da bacia do Rio Doce. Inicialmente esta iniciativa foi tomada pela CPRM, Serviço Geológico do Brasil, e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Ao longo dos anos de operação também participaram como parceiros o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (SIMGE/IGAM) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Atualmente o Sistema de Alerta de Eventos Críticos da Bacia do Rio Doce – SACE Rio Doce – é operado em parceria entre CPRM e a ANA.

As principais atividades da operação do SACE Rio Doce consistem na coleta dos dados hidrometeorológicos, o armazenamento dessas informações, a sua análise, a elaboração da previsão hidrológica e a sua divulgação. Durante todo o período chuvoso os dados hidrometeorológicos são obtidos em mais de 50 pontos instalados na Bacia do Rio Doce. Os níveis dos rios nas estações fluviométricas monitoradas com as respectivas cotas de alerta e de inundação são divulgados por meio de um boletim.

Quando a cota de alerta é alcançada, havendo um risco mais elevado de ocorrer uma inundação, o monitoramento é intensificado com emissão mais frequente de boletins incluindo as previsões para os níveis dos rios nos municípios monitorados. Já a cota de inundação significa que o ponto mais baixo da cidade começa a ser inundado. No decorrer da operação do SACE Rio Doce os boletins são transmitidos diariamente para o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Corpo de Bombeiros, Polícia Militar, Defesa Civil e prefeituras dos municípios da bacia do Rio Doce.

O SACE Rio Doce tem como objetivo alertar direta e indiretamente 16 municípios quanto ao risco de ocorrência de inundações na bacia do Rio Doce. Os municípios diretamente beneficiados são: Ponte Nova, Nova Era, Coronel Fabriciano, Timóteo, Açucena, Governador Valadares, Tumiritinga, no Estado de Minas Gerais; Colatina e Linhares, no Estado do Espírito Santo, para os quais são elaborados boletins técnicos sobre a evolução do nível dos rios nos pontos monitorados. Os municípios indiretamente beneficiados, ou seja, que podem acompanhar a evolução das cheias nas estações de monitoramento hidrológico localizadas em municípios a montante na bacia hidrográfica, são: Antônio Dias, Ipatinga, Resplendor, Galiléia, Conselheiro Pena, Aimorés, no Estado de Minas Gerais; e Baixo Guandu, no Estado do Espírito Santo.

A localização das onze estações fluviométricas que compõem o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) da bacia do Rio Doce e os municípios beneficiados pelo SACE estão apresentados nas Figuras 01 e 02.

A estação de Tumiritinga, código 56920000, está localizada na Latitude 18°58'16"S e Longitude 41°38'30"O, nas margens do Rio Doce e possui uma área de drenagem de 55.100 km². Conforme especificado na ficha descritiva, revisada em 03/04/2018, a estação fluviométrica está instalada 1700 m a jusante da barra do córrego Esquadra, e a 100 m a montante da barra do córrego Capivara, junto ao porto da balsa, na margem esquerda do Rio Doce. O acesso à estação se dá pela rodovia BR-116 partindo de Governador Valadares no sentido Caratinga, após a Polícia Rodoviária Federal deve-se percorrer 3 km e virar à esquerda, seguir mais 12 km até o distrito de São Geraldo de Tumiritinga e mais 33 km até o município de Tumiritinga por rodovia asfaltada.

A Figura 03 ilustra a localização e foto da seção de réguas da estação de Tumiritinga.

Figura 01 – Localização das estações fluviométricas do SACE Rio Doce



Fonte: CPRM (2021)

Figura 02 – Localização dos municípios beneficiados pelo SACE Rio Doce



Fonte: CPRM (2021)

A estação de Tumiritinga possui, desde julho de 1972, seção de réguas limnimétricas convencional instalada para realização de duas leituras diárias pelo observador hidrológico dos níveis do Rio Doce, as 07 e 17 horas. Atualmente não estão instalados equipamentos automáticos para registro contínuo e transmissão dos níveis do Rio Doce.

Ao longo do histórico da estação não houve mudança da cota do zero da régua, ou seja, não foram acrescidos 100 cm ou outro valor às cotas da estação. Nesta estação, a cota de atenção é de 350 cm (1809 m³/s), a cota de alerta de 400 cm (2234 m³/s) e a cota de inundação de 450 cm (2679 m³/s). Ressalva-se que a cota de inundação se refere ao início do alagamento na cidade de Tumiritinga. A cota de transbordamento da calha no trecho onde está instalada a estação fluviométrica de Tumiritinga, código 56920000, segundo a ficha descritiva revisada em 03/04/2018, ocorre a partir da cota de 631 cm pela margem direita. Maiores detalhes sobre a estação podem ser encontrados na sua ficha descritiva que consta do Anexo I.

A Figura 04 apresenta o perfil da seção transversal do Rio Doce na seção de réguas da estação fluviométrica. Esta figura também apresenta graficamente as cotas de alerta (400 cm - 2234 m³/s) e inundação (450 cm - 2679 m³/s) para a estação de Tumiritinga, bem como, as medições simultâneas de vazões e cotas realizadas entre 1972 e 2019, a maior cota observada (936 cm em 03/02/1979) e a maior cota com medição de descarga líquida (586 cm em 19/01/2003). O valor da cota máxima observada (936 cm) em 03/02/1979 foi estabelecido a partir do levantamento da marca de cheia em 08/05/1979 como consta na ficha de inspeção da estação.

Como pode ser visto nesta figura, o perfil da seção transversal foi levantado até a cota 662 cm para a margem direita. Vale lembrar que é de grande importância que os levantamentos de seção transversal sejam realizados até no mínimo a cota máxima observada (936 cm). Também se observa que, para cotas entre 426 e 585 cm, há somente 02 medições de vazão, e ausência de medições de vazão para cotas superiores a 586 cm. A diferença entre a máxima cota com vazão medida (4077 m³/s na cota 586 cm) e a máxima cota observada nas réguas (936 cm) é de 350 cm.

Na figura 05 observa-se o histograma apresentando a frequência de ocorrência das cotas máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) em cada mês. Observa-se que o maior número de cotas máximas para a estação de Tumiritinga, código 56920000, ocorre no mês de janeiro, com 20 ocorrências dentre as 46 cotas máximas da série.

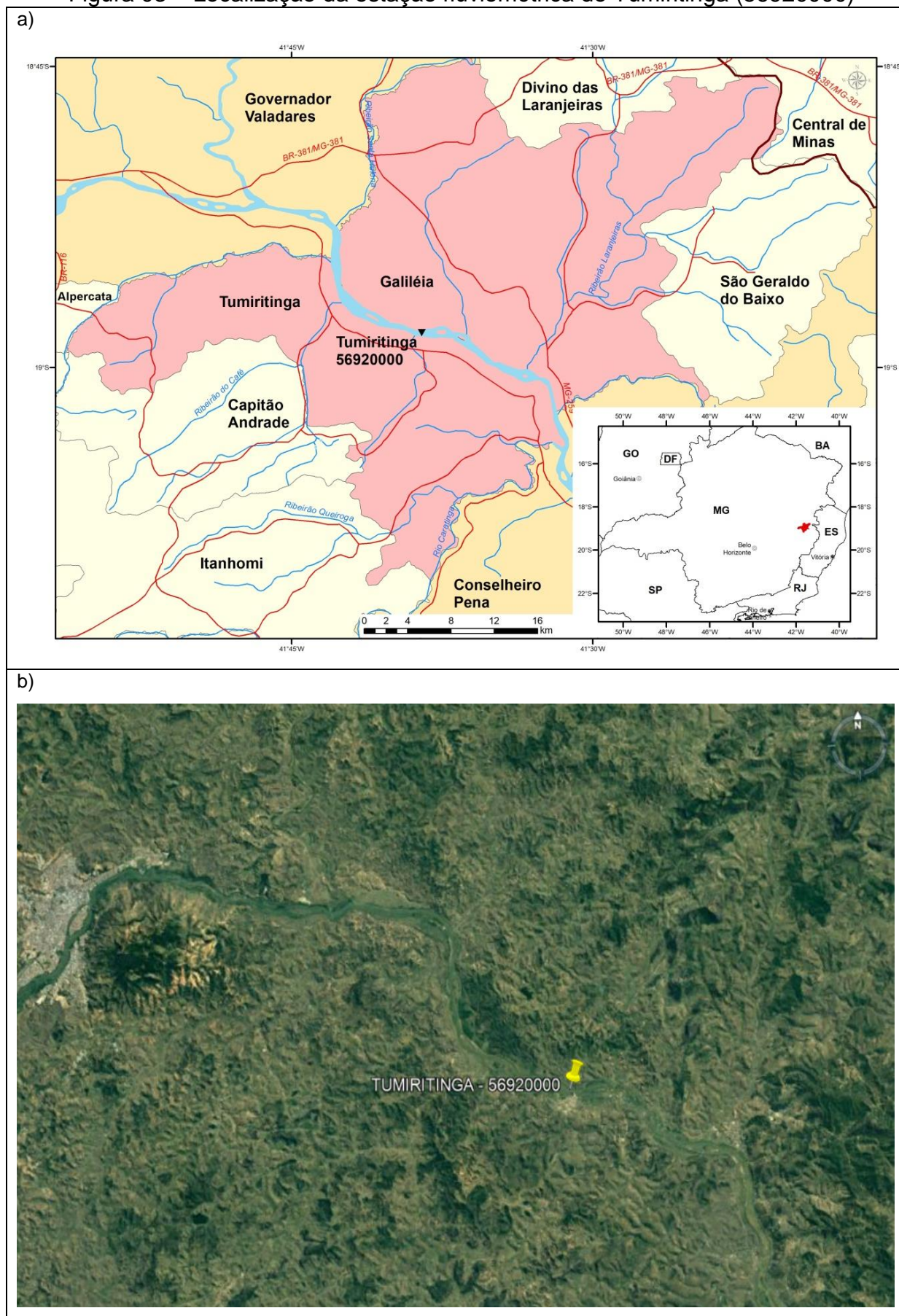
No Anexo III observa-se que a série de cotas máximas por ano hidrológico apresenta 46 valores, sendo 33 valores superiores à cota de alerta (400 cm), ou seja 70%, e 29 valores superiores à cota de inundação (450 cm), ou seja 62%. Destes 47 valores, apenas 11 valores são superiores à maior cota com medição de vazão (586 cm). A razão entre as cotas máximas com medição de vazão e a observada é 1,60

(936 cm / 586 cm). Segundo Tucci (2002) a melhores curvas-chave, aquelas com menor extrapolação do ramo superior, possuem a razão entre as cotas máximas com medição de vazão e a observada inferior a 1,25.

Tais características mencionadas criam dificuldades à extrapolação do ramo superior da curva-chave e ampliam a incerteza na estimativa das vazões a partir das cotas superiores a 586 cm. Entretanto, é necessário mencionar que as medições de vazões em cotas altas envolvem riscos à segurança dos técnicos que podem inviabilizar a realização do trabalho e, além disso, a frequência de ocorrência de grandes cheias pode ser baixa.

Mesmo com as considerações associadas às incertezas das estimativas das vazões em cotas altas citadas anteriormente, foi realizada a análise de frequência de vazões máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set).

Figura 03 – Localização da estação fluviométrica de Tumiritinga (56920000)



c)

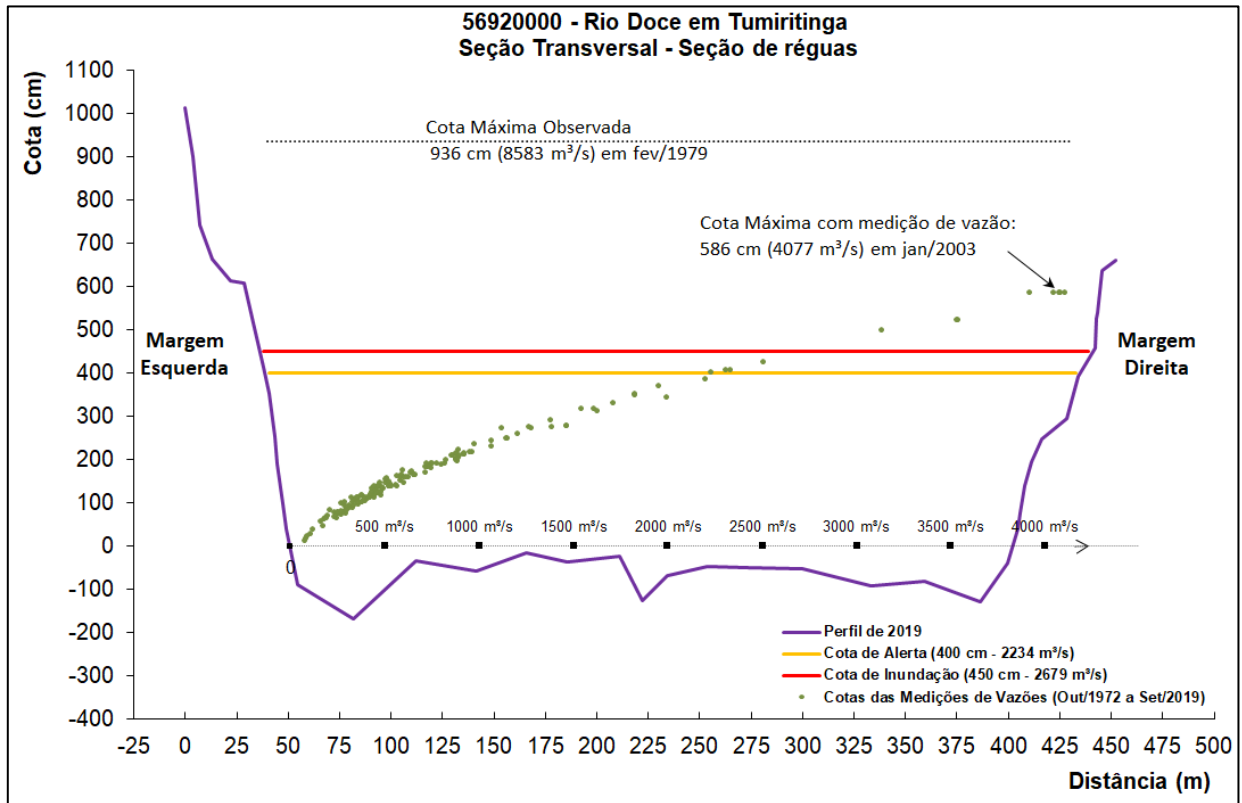


d)



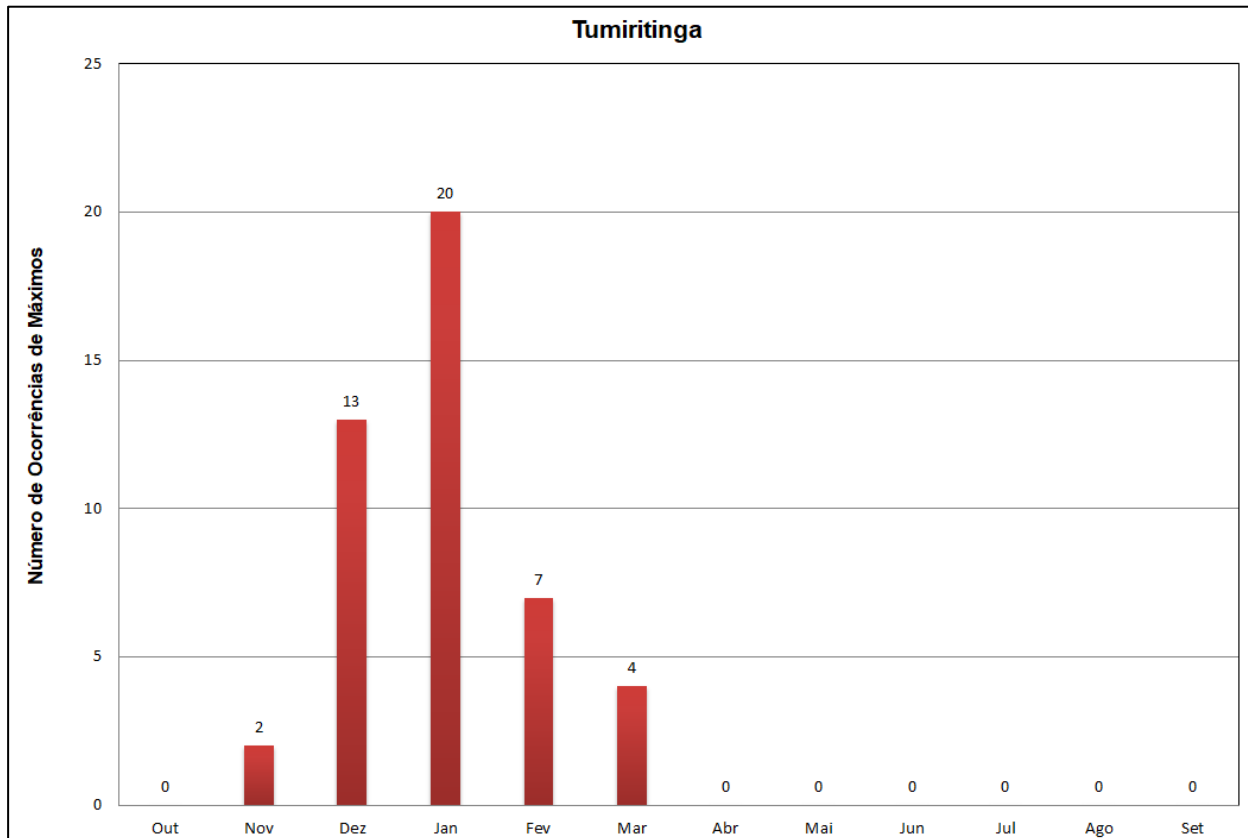
Fonte: a) e d) Elaborada pela DHT/SUREG-BH; b) e c) Elaborada pelos autores a partir do Google Earth

Figura 04 – Perfil da seção transversal da seção de réguas de Tumiritinga



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 05 - Frequência de cotas máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)



Fonte: Elaborada pelos autores.

2 – METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL

A análise estatística deve ser realizada utilizando séries históricas representativas do processo analisado, sem a presença de erros acidentais ou sistemáticos e possuindo um número mínimo de elementos para garantir uma boa confiabilidade nas extrapolações. É recomendável o emprego de séries com pelo menos 30 anos hidrológicos e aceitável no mínimo 15 anos hidrológicos.

Considerando Pinto (2013) e Naghettini e Pinto (2007), foram definidas as seguintes etapas para análise de frequência local de máximos por ano hidrológico:

- Avaliar a consistência dos dados e organizar a série de cotas ou vazões máximas por ano hidrológico.

Na etapa de consistência procura-se identificar problemas com os registros de cotas ou vazões que poderiam desacreditar as informações. Para tanto podem ser realizados métodos consagrados no meio técnico, como por exemplo, verificar se há mudança do zero da régua (mudança de referência); verificar a presença de erro de metro nas cotas; verificar a presença de erro de 1/2 metro nas cotas; verificar a presença de erro de digitação; comparar a cota máxima com a cota média diária; avaliar o comportamento dos cotogramas das estações de montante e jusante; verificar as cotas máximas da série disponível nos bancos de dados com os boletins de campo; avaliar os dados que estão como duvidosos ou estimados; avaliar o preenchimento de falhas (média, linígrafo e PCD); verificar as medições de vazões; analisar as curvas-chave; verificar a continuidade das vazões etc.

- Verificar a presença de valores atípicos (*outliers*)

A presença de valores atípicos (superiores e inferiores) é avaliada com o critério baseado na amplitude interquartil, AIQ (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 39), e com o teste de Grubbs e Beck (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 287). O valor atípico pode ter origem em erros de medição ou de processamento, mas, também pode ser o produto de causas naturais indeterminadas. Se for identificado que o valor atípico é inconsistente, este deve ser excluído da amostra. Em caso de presença de *outliers* realmente observados deve-se avaliar a manutenção ou retirada destes pontos amostrais atípicos. Pois, a presença de pontos atípicos em uma dada amostra, pode afetar drasticamente o ajuste da distribuição de probabilidades.

- Avaliar a independência, a homogeneidade e a estacionariedade das séries.

A independência dos valores de uma série significa que nenhuma observação pode influenciar a ocorrência, ou não ocorrência, da observação seguinte. No projeto de Regionalização de Vazões do Brasil a hipótese de independência é avaliada com o teste não paramétrico proposto por Wald e Wolfowitz (1943). A descrição detalhada deste teste é encontrada em Naghettini e Pinto (2007, p. 264).

Uma amostra é considerada homogênea quando todos os elementos provêm de uma única e idêntica população. A recomendação é avaliar a homogeneidade da série por meio do teste não-paramétrico proposto por Mann e Whitney (1947), o qual está descrito em detalhes em Naghettini e Pinto (2007, p. 265).

A estacionariedade de uma série, de um ponto de vista intuitivo, está associada a não alteração das características estatísticas ao longo do tempo o que significa a não existência de tendências, saltos e outras propriedades. Nos trabalhos da Regionalização a verificação da estacionariedade das séries é efetuada pelo teste não-paramétrico de Spearman, o qual encontra-se descrito em Naghettini e Pinto (2007, p. 267).

- Estimar a distribuição empírica.

A estimativa da distribuição empírica é realizada com ordenação decrescente da série e o cálculo da posição de plotagem pela fórmula de Weibull, ou seja, no caso de séries de máximos por ano hidrológico temos $P(P > p) = m/(N + 1)$, onde m é número de ordem e N o tamanho de amostra.

- Definir as distribuições teóricas de probabilidades candidatas a modelagem das vazões ou cotas máximas por ano hidrológico.

A definição da distribuição teórica de probabilidade é de suma importância, pois valores calculados para um mesmo período de retorno podem apresentar grandes variações quando estimados por diferentes distribuições. Os modelos teóricos candidatos são as distribuições de dois parâmetros Gumbel e Log-Normal e de três parâmetros GEV, Log-Normal com três parâmetros e a Log-Pearson Tipo III. No caso de séries inferiores a 30 anos serão avaliadas somente distribuições com dois parâmetros.

- Calcular os parâmetros das distribuições teóricas de probabilidades candidatas.

A estimativa dos parâmetros das distribuições candidatas é efetuada pelo método dos momentos-L (HOSKING; WALLIS, 1997). O Anexo II apresenta as funções densidade e acumulada de probabilidades das distribuições candidatas e as equações para cálculo dos parâmetros.

- Definir a distribuição teórica que será adotada na modelagem das séries a partir da verificação da aderência à distribuição empírica.

A aderência da distribuição teórica candidata à curva da distribuição empírica é verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A descrição detalhada destes testes é encontrada em Naghettini e Pinto (2007, p. 275 - 278).

- Estimar os quantis associados a diferentes tempos de retorno.

Após a conclusão das etapas anteriores, calcular os quantis associados a diferentes tempos de retorno de interesse.

3 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA LOCAL

A análise de frequência local das vazões do rio Doce em Tumiritinga, código 56920000, foi efetuada utilizando a série de vazões máximas por ano hidrológico (01/Out a 30/Set) apresentadas no Anexo III. Neste anexo também são apresentados alguns endereços de vídeos disponíveis na Internet de eventos de cheia registrados na região.

A série de vazões apresentou valores atípicos superiores (outliers) através do critério baseado na amplitude interquartil, AIQ, não apresentando quando avaliada pelo teste de Grubbs e Beck. Optou-se por não retirá-los da série. As hipóteses nulas de independência, homogeneidade e estacionariedade foram aceitas para o nível de significância de 5%. A distribuição de frequência selecionada foi a GEV, com os parâmetros calculados pelo método dos momentos-L e também apresentados no Anexo III. A distribuição GEV foi selecionada por apresentar menor desvio padrão dos resíduos entre a distribuição empírica e a teórica. A Figura 06 apresenta o gráfico com as distribuições empírica e teórica ajustadas.

Como o parâmetro de forma é diferente de zero, $k \neq 0$, os quantis da GEV podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \xi + \frac{\alpha\{1-[-\ln(F)]^k\}}{k} \quad (01)$$

Onde T é o tempo de retorno (anos)

ξ é o parâmetro de posição (2603,755)

α é o parâmetro de escala (943,494)

k é o parâmetro de forma (-0,127)

$F_x(x)$ é a $P(x \leq x_T) = (1 - 1/T)$.

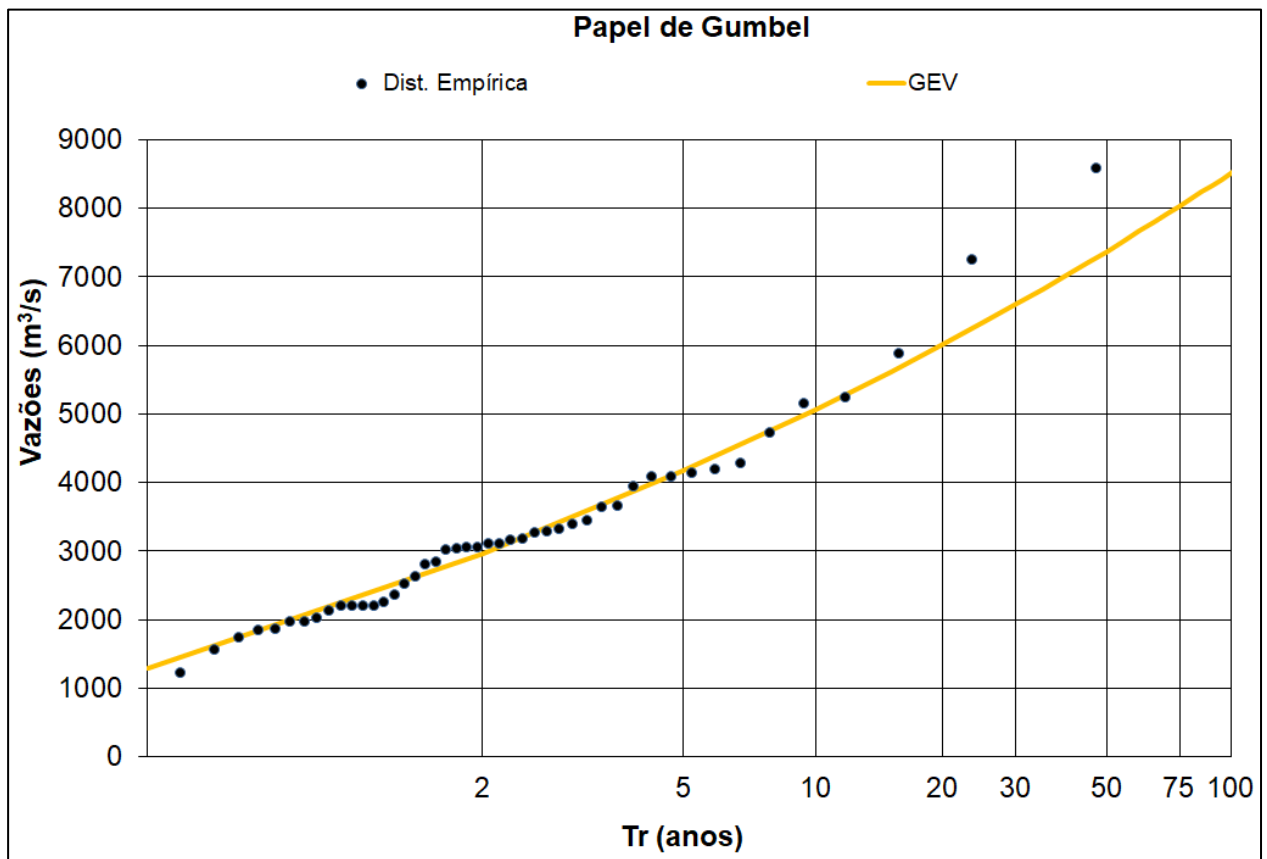
A equação 01 é válida para tempos de retorno de 1,01 até 100 anos. Empregando a equação 01 foi possível calcular as vazões associadas a diferentes tempos de retorno. Os resultados estão apresentados na Tabela 01.

Tabela 01 – Vazões em m^3/s , associadas a diferentes tempos de retorno

	Tempo de Retorno, T (anos)												
	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90	100
Vazão (m^3/s)	2958	4163	5063	5610	6011	6330	6596	7029	7374	7663	8025	8328	8507

Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 06 – Ajuste das distribuições empírica e teórica



Fonte: Elaborada pelos autores.

4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

a) Em 03/02/1979 o rio Doce em Tumiritinga, código 56920000, alcançou a cota de 936 cm. Qual é o tempo de retorno da vazão associada a esta cota?

Resposta: *Inicialmente, será necessário calcular a vazão associada à cota de 936 cm com a curva-chave válida para fevereiro de 1979 utilizando a equação AIII-01 (Anexo III).*

Para a cota 936, aceitando-se a extrapolação da curva-chave disponível, os parâmetros são $a = 176,314$, $h_0 = -0,47$ m e $n = 1,70$ (Anexo III). Dessa forma temos:

$$Q(h) = a (h - h_0)^n$$

$$Q(936 \text{ cm}) = 176,314 \left(\frac{936}{100} + 0,47 \right)^{1,70}$$

$$Q(936 \text{ cm}) = 8583 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para se calcular o tempo de retorno será necessária a inversão FAP da GEV. Dessa forma temos:

$$F_X(x) = 1 - \frac{1}{T} = \exp[-\exp(-y)] \quad (02)$$

$$\text{Para } k \neq 0 \text{ temos: } y = -\frac{1}{k} \ln \left[1 - \frac{(x-\xi)k}{\alpha} \right]$$

$$T = \frac{1}{1-F_X(x)} = \frac{1}{1 - \left\{ \exp \left[-\exp \left(\frac{1}{k} \ln \left[1 - \frac{(x-\xi)k}{\alpha} \right] \right) \right] \right\}} \quad (03)$$

onde, $\xi = 2603,755$ é o parâmetro de posição, $\alpha = 943,494$ é o parâmetro de escala e $K = -0,127$ é o parâmetro de forma da GEV.

Substituindo os valores na equação 03 temos:

$$T = \frac{1}{1 - \left\{ \exp \left[-\exp \left(\frac{1}{-0,127} \ln \left[1 - \frac{(x-2603,755)(-0,127)}{943,494} \right] \right) \right] \right\}} = 104,56 \text{ anos}$$

O tempo de retorno de 104,56 anos corresponde a probabilidade de 0,96% da vazão de 8.583 m³/s associada a cota 936 cm ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 8583 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{104,56} 100 = 0,96 \%$$

b) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de alerta em Tumiritinga, código 56920000?

Resposta: A cota de alerta em Tumiritinga, código 56920000, é 400 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 2234 m³/s (Ramo 04). Substituindo a vazão calculada e os parâmetros da distribuição GEV na equação 03, como no primeiro exemplo, temos que o tempo de retorno da vazão associada à cota de 400 cm é de 1,29 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 77,57%.

c) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à cota de inundação em Tumiritinga, código 56920000?

Resp: A cota de inundação em Tumiritinga, código 56920000, é 450 cm. Considerando a curva-chave mais recente e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 2679 m³/s (Ramo 04). Substituindo a vazão calculada e os parâmetros da distribuição GEV na equação 03, como no primeiro exemplo, temos que o tempo de retorno da vazão associada à cota de 450 cm é de 1,66 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 60,3%.

5 – REFERÊNCIAS

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Alerta Contra Enchentes na Bacia do Rio Doce**. Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta – Dezembro de 2002 a Abril de 2003. Belo Horizonte: CPRM, 2003.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Alerta Contra Enchentes da Bacia do Rio Doce**: Relatório Técnico do Sistema – Estudos Complementares. Belo Horizonte: CPRM, 2010.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Doce**: Relatório Técnico da Operação do Sistema de Alerta no período de novembro de 2020 a abril de 2021. Belo Horizonte: CPRM, 2021.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis**: - an approach based on L-moments. New York: Cambridge University Press, 1997.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, p. 50-60, 1947. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>. Disponível em: <https://projecteuclid.org/journals/annals-of-mathematical-statistics/volume-18/issue-1/On-a-Test-of-Whether-one-of-Two-Random-Variables/10.1214/aoms/1177730491.full>. Acesso em: 05 mar. 2021.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/454>. Acesso em 17 abr. 2021.

PINTO, E. J. A. **Atlas Pluviométrico**: metodologia para definição das equações intensidade-duração-frequência do Projeto Atlas Pluviométrico. Belo Horizonte: CPRM, 2013. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/11560>. Acesso em: 08 mar. 2021.

PLANO integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio doce: volume 1 – relatório final. [S.l.]: Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do Rio Doce. Disponível em: https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/12/PIRH_Doce_Volume_I.pdf. Acesso em: 22 abr. 2021.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Brasília: ANA; Porto Alegre, UFRGS. 2002.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 14, p. 378-388, 1943. DOI: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177731358>. Disponível em: <https://projecteuclid.org/journals/annals-of-mathematical-statistics/volume-14/issue-4/An-Exact-Test-for-Randomness-in-the-Non-Parametric-Case/10.1214/aoms/1177731358.full?tab=ArticleLink>. Acesso em: 05 mar. 2021.

ANEXO I
Ficha Descritiva
Estação Fluviométrica de Tumiritinga, código 56920000

ESTAÇÃO: TUMIRITINGA		TIPO: FRDSQT	CÓDIGO: 56920000	
REGIÃO HIDROGRÁFICA: Atlântico Leste			BACIA: Atlântico, Trecho Leste	
RIO: 56001000 - RIO DOCE		UF: MG	MUNICÍPIO: Tumiritinga	
ENTIDADE COORDENADORA: ANA		ENTIDADE OPERADORA: CPRM/BH		
ÁREA DE DRENAGEM (Km²): 55.425		DRENAGEM GERAL: Oceano Atlântico		
LAT.: -18°58'18.00" LONG.: -41°38'31.00"		INST.: GPS GARMIN ETREX LEGEND	DATUM: WGS 84	
ALT.(m): 135 m	INST.: Carta topográfica	DATUM:	REF. CART.: SE-24-Y-A-IV	
FOLHA: Governador Valadares		ESCALA: 1:100.000	ANO: 1980	
ESTAÇÃO	TIPO	DATA DA INSTALAÇÃO	DATA DA EXTINÇÃO	ENTIDADE
FLUVIOMÉTRICA	F	14.07.72		CPRM
FLUVIOGRÁFICA	FR	13.01.76		CPRM
SEDIMENTOMÉTRICA	S	08.08.74		CPRM
QUALIDADE DAS ÁGUAS	Q			
ESTAÇÃO TELEMÉTRICA: <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não DATA DA INSTALAÇÃO:				
LOCALIZAÇÃO: 1700 m a jusante da barra do córrego Esquadra, e a 100 m a montante da barra do córrego Capivara, junto ao porto da balsa e na margem esquerda do rio.				
ACESSIBILIDADE: Por estrada asfaltada que liga Governador Valadares a Resplendor, entrar à direita no km 11, depois seguir por estrada de terra até o porto (10 km de Tumiritinga). Partindo de Governador Valadares, sentido Caratinga pela BR-116 após a Polícia Rod. Federal percorrer 3 km e virar à esquerda. Seguir mais 12km até São Geraldo de Tumiritinga e mais 33 km até Tumiritinga por estrada asfaltada.				
DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO (RÉGUAS, LANCES, RRNN, SM, SR, PI, PF, etc.)				
MARGEM: esquerda				
RÉGUAS: 8 lances com 10 réguas de alumínio fixadas em estacas suporte:				
1º LANCE:	000/100 cm	9º LANCE:	800/1000 cm	
2º LANCE:	100/200 cm			
3º LANCE:	200/300 cm			
4º LANCE:	300/400 cm			
5º LANCE:	400/500 cm			
6º LANCE:	500/600 cm			
7º LANCE:	600/700 cm			
8º LANCE:	700/800 cm			
RRNN:				
RN-P4	6673 mm	calota de alumínio fixada em bloco de concreto.		
RN1	6758 mm	calota de alumínio fixada em bloco de concreto.		
SEÇÃO MEDIDORA Única, 2,40 m a jusante das escalas.				
PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGA: Seção medidora desativada.				
QUALIDADE DE ÁGUA: Quatro parâmetros: temperatura, pH, OD e condutividade elétrica.				
EQUIPAMENTOS				
ESPÉCIE	Nº PATRIMÔNIO	Nº SÉRIE	PROPRIETÁRIO	EM OPERAÇÃO DATA INSTALAÇÃO
Linógrafo	96153690			

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES:

POTAMOGRAFIA: Rio Doce - Nasce na Serra Trapizonga, município de Ressaquinha-MG, com o nome de rio Piranga. Afluentes m.e.: rio Carmo, Piracicaba, Santo Antonio, Suaçuí Grande; m.d.: rio Chopotó, Casca, matipó, Cuité, Manhuaçu, Guandu. Deságua no Oceano Atlântico - ES. Área da Bacia hidrográfica 84.700 Km².

POSIÇÃO EM RELAÇÃO À REDE:

MONTANTE: AIMORÉS - CASA DAS BOMBAS JUSANTE: GOVERNADOR VALADARES

CARACTERÍSTICA DO TRECHO:

Regime:

- Perene Intermitente
 Efêmero

Conformação:

- Retilínio Anastomosado
 Curvo Meandrante

Leito

- Regular Irregular

NATUREZA E INCLINAÇÃO DAS MARGENS

NATUREZA:

ME: Arenosa com vegetação de médio porte
MD: Arenosa com vegetação de grande porte

INCLINAÇÃO:

ME: Média
MD: Média

NATUREZA DO LEITO: Areia e pedra

CONTROLE: Corredeira

LOCALIZAÇÃO: Jusante

DISTÂNCIA (m): 150 m

COTA DE TRANSBORDAMENTO (cm): 631 cm

MARGEM DIREITA

MARGEM ESQUERDA

OBSERVADOR:

NOME:

PROFISSÃO:

GRAU DE INSTRUÇÃO:

ENDEREÇO

FONE:

BAIRRO:

CEP:

CIDADE:

ESTADO:

DISTÂNCIA DA RESIDÊNCIA ATÉ A ESTAÇÃO (m):

MEIO DE COMUNICAÇÃO MAIS PRÓXIMO DA CASA DO OBSERVADOR

DISTÂNCIA DA CASA DO OBSERVADOR (m)

OBSERVAÇÃO:

NA AUSÊNCIA DO OBSERVADOR PROCURAR PO

NOME:

ENDEREÇO:

FONE:

BAIRRO:

CEP:

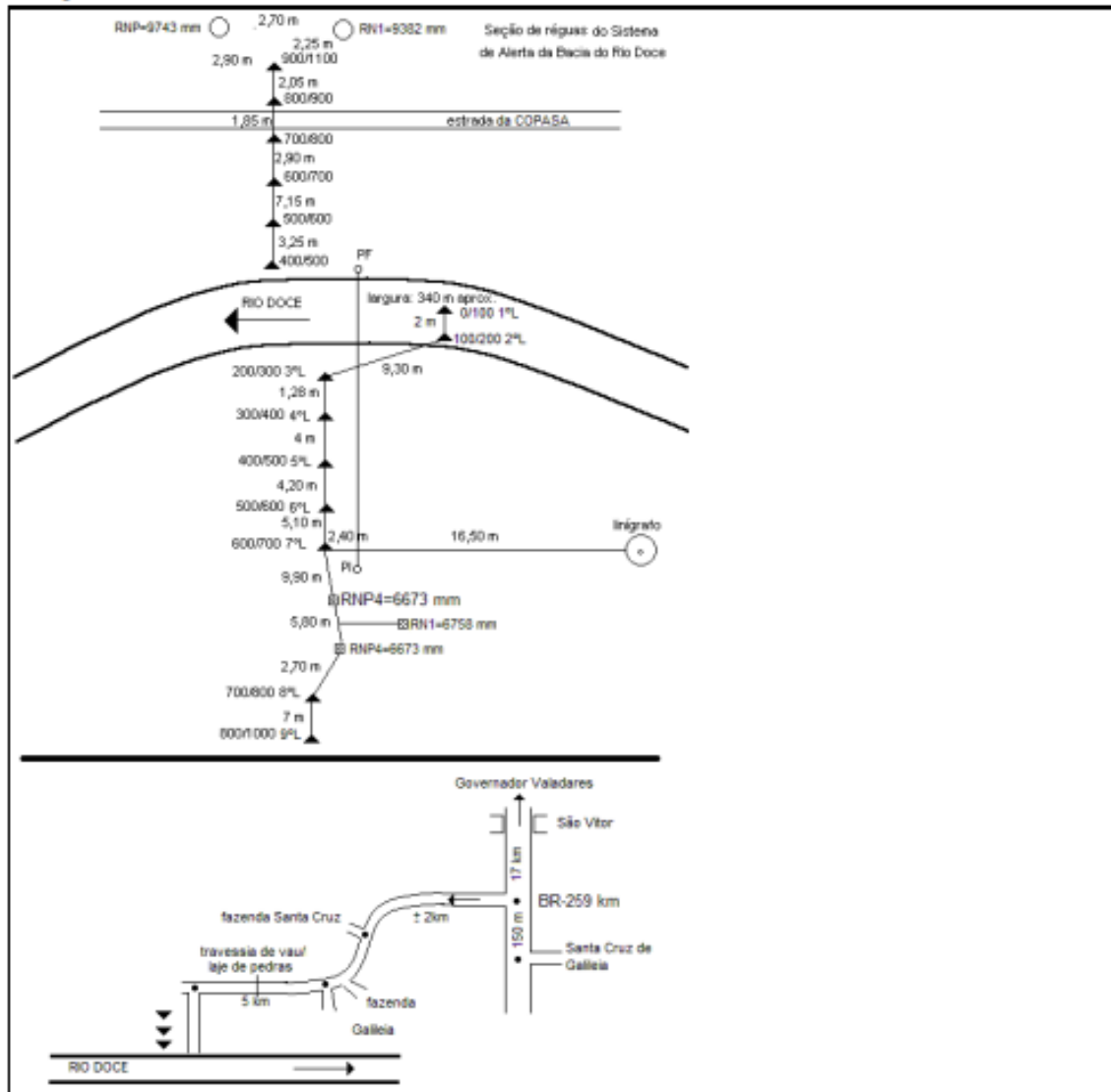
CIDADE:

ESTADO:

OBSERVAÇÕES:

Não efetua pagamento ao Fundo Rural. Foi instalada uma seção de réguas na margem direita do rio e a jusante da captação de água da COPASA, para atender ao Sistema de Alerta da Bacia do Rio Doce. Coordenadas: lat. 18°58'07" e longitude 41°30'26". Amplitude: 400/1100. Número de lances: 6. RN1=PI, PF=cantoneira na MD430,15 m ou RNP-5.

CROQUI:



ANEXO II
Distribuições Candidatas

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL

- Função Densidade de Probabilidade

$$f_X(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]$$

Parâmetros: α é o parâmetro de escala e β é o parâmetro de posição

Limites: $-\infty \leq x < \infty$

- Função Acumulada de Probabilidades

$$F_X(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]$$

- Inversa da função acumulada

$$x = \beta - \alpha \ln[-\ln(F(x))]$$

- Momentos L

$$\lambda_1 = \beta + \alpha\gamma_E \quad \lambda_2 = \alpha \ln(2) \quad \lambda_3 = \alpha[2\ln(3) - 3\ln(2)] \quad \lambda_4 = \alpha[5\ln(4) - 10\ln(3) + 6\ln(2)]$$

$$\tau_3 = 0,1699 \quad \tau_4 = 0,1504$$

- Estimativa dos parâmetros pelos momentos-L

$$\hat{\alpha} = \frac{l_2}{\ln(2)}$$

$$\hat{\beta} = \frac{l_1}{\hat{\alpha}} - \gamma_E \hat{\alpha}$$

Onde l_1 e l_2 são os momentos-L amostrais e $\gamma_E = 0,5572157$ é a constante de Euler.

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL

Os dados transformados pelo logaritmo natural, $\ln(x)$, se distribuem como uma normal

DISTRIBUIÇÃO NORMAL

- Função Densidade de Probabilidade

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)$$

Parâmetros: μ é o parâmetro de posição e σ é o parâmetro de escala

Limites: $-\infty \leq x < \infty$

- Função Acumulada de Probabilidades

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt$$

- Inversa da função acumulada

$x(F)$ não possui forma analítica

- Momentos-L

$$\lambda_1 = \mu \quad \lambda_2 = 0,5642\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sigma \quad \tau_3 = 0 \quad \tau_4 = 0,1226 = [30\pi^{-1}\arctan(\sqrt{2})] - 9$$

- Estimativa de parâmetros pelos momentos-L

$$\hat{\mu} = \lambda_1$$

$$\hat{\sigma} = \lambda_2\sqrt{\pi}$$

OBS: Inicialmente os dados são transformados pelo logaritmo natural, $\ln(x)$. Em seguida são calculados os momentos-L e depois os parâmetros.

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL (3P)

A função densidade de Probabilidade da Log-Normal (3P) é dada por:

$$f(x) = \frac{e^{ky-y^2/2}}{\alpha\sqrt{2\pi}} \quad y = \begin{cases} -k^{-1} \log\{1 - k(x - \xi)/\alpha\} & k \neq 0 \\ (x - \xi)/\alpha & k = 0 \end{cases}$$

A função Acumulada de probabilidade é dada por: $F(x) = \Phi(y)$

na qual, Φ denota a função de distribuição acumulada Normal padrão.

$x(F)$ não apresenta forma analítica explícita.

Parâmetros : ξ (Posição), α (Escala) e k (forma)

Os limites da função são:

Para, $k > 0$: $-\infty < x \leq \xi + \alpha/k$; $k = 0$: $-\infty < x < \infty$; $k < 0$: $\xi + \alpha/k \leq x < \infty$

Os parâmetros podem ser estimados pelos momentos-L com as seguintes equações:

$$k \approx -\tau_3 \frac{E_0 + E_1\tau_3^2 + E_2\tau_3^4 + E_3\tau_3^6}{1 + F_1\tau_3^2 + F_2\tau_3^4 + F_3\tau_3^6} \quad \text{para } |\tau_3| \leq 0,94$$

E_0	E_1	E_2	E_3	F_1	F_2	F_3
2,0466534	-3,6544371	1,8396733	-0,20360244	-2,0182173	1,2420401	-0,21741801

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k e^{\frac{k^2}{2}}}{1 - 2\Phi(-k/\sqrt{2})} \quad \text{e} \quad \xi = \lambda_1 - \frac{\alpha}{k} \left(1 - e^{\frac{k^2}{2}} \right)$$

Nesta parametrização, a distribuição Log-Normal é a distribuição de uma variável aleatória X que está relacionada a uma variável aleatória Z de distribuição Normal padrão, pela seguinte equação:

$$X = \begin{cases} \xi + \alpha(1 - e^{-kZ})/k & k \neq 0 \\ \xi + \alpha Z & k = 0 \end{cases}$$

Z é variável normal central reduzida.

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO LOG-PEARSON TIPO III

Uma variável x segue a distribuição Log-Pearson tipo III, quando a variável transformada $Y = \ln(X)$ distribui-se de acordo com a Pearson tipo III.

A distribuição Pearson Tipo III possui os parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ

Se $\gamma \neq 0$, temos $\alpha = 4/\gamma^2$, $\beta = \frac{1}{2}\sigma|\gamma|$ e $\xi = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma}$

Se $\gamma > 0$, então os limites de x são os seguintes: $\xi \leq x \leq \infty$ e as FDP e FAP

$$f(x) = \frac{(x - \xi)^{\alpha-1} e^{-(x-\xi)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

$$F(x) = \frac{G\left(\alpha, \frac{x-\xi}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}$$

Se $\gamma = 0$, então a distribuição é Normal e os limites de x são os seguintes: $-\infty \leq x \leq \infty$ e as FDP e FAP

$$f(x) = \phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

Se $\gamma < 0$, então os limites de x são os seguintes: $-\infty \leq x \leq \xi$ e as FDP e FAP

$$f(x) = \frac{(\xi - x)^{\alpha-1} e^{-(\xi-x)/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

$$F(x) = 1 - \frac{G\left(\alpha, \frac{\xi-x}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}$$

$\Gamma(\alpha)$ é a função Gama dada por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

$G(\alpha, x)$ é a função Gama incompleta dada por:

$$G(\alpha, x) = \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad \text{e} \quad \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt$$

Os parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ da distribuição Pearson Tipo III podem ser calculados pelo método dos momentos-L com as equações

$$\begin{aligned} \mu &= \lambda_1 \\ \sigma &= \frac{\lambda_2 \pi^{1/2} c^{1/2} \Gamma(c)}{\Gamma\left(c + \frac{1}{2}\right)} \\ \gamma &= 2c^{-1/2} \sin al(\tau_3). \end{aligned}$$

A variável c é estimada considerando duas situações.

A primeira, se $0 < |\tau_3| < 1/3$, nesse caso adotar $z = 3\pi\tau_3^2$ e aplicar a equação

$$c \approx \frac{1 + 0,2906z}{z + 0,1882z^2 + 0,0442z^3}.$$

A segunda, se $1/3 \leq |\tau_3| < 1$, nessa situação adota-se $z = 1 - |\tau_3|$ e emprega-se a equação

$$c \approx \frac{0,36067z - 0,59567z^2 + 0,25361z^3}{1 - 0,78861z + 2,56096z^2 - 0,77045z^3}$$

A distribuição Pearson Tipo III com parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ , apresenta algumas relações importantes com as distribuições Gama e Normal, as quais facilitam a estimação dos quantis. Quando o parâmetro de forma γ é positivo, a Pearson-III está associada à distribuição Gama. Se o parâmetro de forma γ é negativo,

a Pearson-III está associada à distribuição Gama refletida. E, quando o parâmetro de forma γ é igual a zero, a Pearson-III está relacionada à distribuição Normal. Considerando que uma variável x segue uma distribuição Pearson tipo III, com parâmetros de posição μ , escala σ e forma γ , a relação entre esses parâmetros e os das distribuições Gama e Normal são as seguintes:

- Se $\gamma > 0$, então $X - \mu + \frac{2\sigma}{\gamma}$ segue uma distribuição Gama com parâmetros

$\alpha = \frac{4}{\gamma^2}$ e $\beta = \frac{\sigma \cdot \gamma}{2}$. Desse modo, os quantis da Pearson-III com parâmetro de

forma positivo podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma} + G^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)$$

onde τ é o tempo de retorno e $G^{-1}()$ é a inversa da distribuição Gama com parâmetros α e β .

- Se $\gamma < 0$, então $-X + \mu - \frac{2\sigma}{\gamma}$ segue uma distribuição Gama com parâmetros

$\alpha = \frac{4}{\gamma^2}$ e $\beta = \left|\frac{\sigma \cdot \gamma}{2}\right|$. Desse modo, os quantis da Pearson-III com parâmetro de

forma negativo podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma} - G^{-1}\left(\frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)$$

onde τ é o tempo de retorno e $G^{-1}()$ é a inversa da distribuição Gama com parâmetros α e β .

- Se $\gamma = 0$, então x segue uma distribuição Normal com parâmetros μ e σ . Assim, os quantis da Pearson-III com parâmetro de forma nulo podem ser calculados pela equação:

$$x(T) = \mu + \sigma \cdot Z_T$$

onde τ é o tempo de retorno e z_T é a variável normal central reduzida associada uma probabilidade $(1-1/T)$. Recorde que, no programa Microsoft EXCEL, a inversa da distribuição Gama com parâmetros α e β pode ser calculada com a função INVGAMA() e a variável normal central reduzida com a função INV.NORMP().

Quando uma variável x segue a distribuição Log-Pearson tipo III, é um fato matemático que a variável transformada $Y = \ln(X)$ distribui-se de acordo com a Pearson tipo III. Assim, os parâmetros podem ser calculados por meio dos logaritmos dos valores observados e os quantis são estimados por meio das seguintes equações:

Para $\gamma_{\ln X} > 0$

$$x(T) = \exp\left\{\mu_{\ln X} - \frac{2 \cdot \sigma_{\ln X}}{\gamma_{\ln X}} + G^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)\right\}$$

Para $\gamma_{\ln X} < 0$

$$x(T) = \exp\left\{\mu_{\ln X} - \frac{2 \cdot \sigma_{\ln X}}{\gamma_{\ln X}} - G^{-1}\left(\frac{1}{T}, \alpha, \beta\right)\right\}$$

Para $\gamma_{\ln X} = 0$

$$x(T) = \exp(\mu_{\ln X} + \sigma_{\ln X} \cdot Z_T)$$

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO GENERALIZADA DE EVENTOS EXTREMOS (GEV)

A função densidade de Probabilidade da GEV é dada por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \exp[-(1-k)y - \exp(-y)]$$

$$\text{Para } k=0, \quad y = \frac{x-\xi}{\alpha}$$

$$\text{Para } k \neq 0 \quad y = -\frac{1}{k} \ln \left[1 - \frac{(x-\xi)k}{\alpha} \right].$$

Os limites da função são:

Para $k < 0$: $\xi + \frac{\alpha}{k} \leq x \leq \infty$, para $k = 0$: $-\infty \leq x \leq \infty$ e para $k > 0$: $-\infty < x \leq \xi + \frac{\alpha}{k}$

$$F_x(x) = \exp[-\exp(-y)]$$

$$x(F) = \xi - \alpha \ln[-\ln(F)] \quad , k = 0$$

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - [-\ln(F)]^k \right\} \quad , k \neq 0$$

Onde k , α e ξ são os parâmetros de forma, escala e posição, respectivamente. A estimação dos parâmetros pelos momentos-L pode ser efetuada por meio das seguintes equações:

$$\hat{k} \approx 7,8590c + 2,9554c^2 \quad , \text{ para } -0,5 \leq \tau_3 \leq 0,5$$

Sendo

$$c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)} = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)} = \frac{(2\beta_1 - \beta_0)}{(3\beta_2 - \beta_0)} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{k}\lambda_2}{(1 - 2^{-\hat{k}})\Gamma(1 + \hat{k})}$$

$$\hat{\xi} = \lambda_1 - \frac{\hat{\alpha}}{\hat{k}} \left[1 - \Gamma(1 + \hat{k}) \right]$$

Fonte: Hosking e Wallis (1997)

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas e Vazões máximas por ano hidrológico

Curvas-chave

Vídeos na INTERNET registrando alguns grandes eventos de cheia

Estatísticas da série

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas (cm) e Vazões (m³/s)

Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão (m ³ /s)	Observações
1	1972	1973	15/03/1973	07:00	547	3645	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
2	1973	1974	05/01/1974	-	394	2197	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
3	1974	1975	06/01/1975	07:00	368	1981	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
4	1975	1976	13/11/1975	17:00	368	1981	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
5	1976	1977	01/02/1977	17:00	522	3388	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
6	1977	1978	08/03/1978	17:00	463	2813	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
7	1978	1979	03/02/1979	-	936	8583	Nivelamento da marca de cheia/Vazão gerada a partir da curva-chave
8	1979	1980	19/01/1980	17:00	489	3061	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
9	1980	1981	11/12/1980	17:00	401	2257	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
10	1981	1982	27/01/1982	17:00	576	3953	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
11	1982	1983	08/01/1983	17:00	489	3061	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
12	1983	1984	12/12/1983	17:00	500	3169	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
13	1984	1985	30/01/1985	-	740	5881	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
14	1985	1986	10/01/1986	17:00	528	3449	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
15	1987	1988	14/01/1988	-	431	2519	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
16	1989	1990	18/12/1989	-	494	3110	M/Vazão gerada a partir da curva-chave
17	1990	1991	27/03/1991	07:00	501	3178	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
18	1991	1992	09/02/1992	07:00	607	4293	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
19	1992	1993	09/11/1992	07:00	487	3042	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
20	1993	1994	07/01/1994	17:00	395	2205	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

DL – Cotas de dupla leitura (07 e 17 h) – horário de Brasília

M – Vazão gerada a partir da cota média da dupla leitura (07 e 17 h)

* – Cota máxima das estatísticas de cotas médias brutas do sistema de gerenciamento de dados hidrometeorológicos (HIDRO) fornecido pela ANA. A cota máxima registrada nas estatísticas refere-se à cota máxima entre as leituras de 07 e 17 h

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas (cm) e Vazões (m³/s)

Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

Continuação

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão (m ³ /s)	Observações
21	1994	1995	27/12/1994	17:00	386	2130	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
22	1995	1996	29/12/1995	17:00	494	3110	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
23	1996	1997	07/01/1997	07:00	844	7262	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
24	1997	1998	20/12/1997	07:00	466	2841	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
25	1998	1999	06/01/1999	07:00	353	1861	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
26	1999	2000	10/02/2000	17:00	394	2197	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
27	2000	2001	06/01/2001	07:00	351	1845	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
28	2001	2002	02/01/2002	07:00	511	3278	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
29	2002	2003	19/01/2003	07:00	588	4083	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
30	2003	2004	17/01/2004	07:00	444	2637	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
31	2004	2005	08/03/2005	-	645	4726	*/Vazão gerada a partir da curva-chave
32	2005	2006	17/12/2005	07:00	516	3328	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
33	2006	2007	14/12/2006	07:00	512	3288	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
34	2007	2008	02/02/2008	17:00	374	2030	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
35	2008	2009	08/01/2009	07:00	599	4204	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
36	2009	2010	08/12/2009	17:00	397	2209	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
37	2010	2011	31/12/2010	07:00	595	4149	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
38	2011	2012	07/01/2012	07:00	690	5252	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
39	2012	2013	01/02/2013	07:00	340	1746	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

DL – Cotas de dupla leitura (07 e 17 h) – horário de Brasília

M – Vazão gerada a partir da cota média da dupla leitura (07 e 17 h)

* – Cota máxima das estatísticas de cotas médias brutas do sistema de gerenciamento de dados hidrometeorológicos (HIDRO) fornecido pela ANA. A cota máxima registrada nas estatísticas refere-se à cota máxima entre as leituras de 07 e 17 h

ANEXO III

Série de Dados Utilizados – Cotas (cm) e Vazões (m³/s)

Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

Continuação

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão (m ³ /s)	Observações
40	2013	2014	24/12/2013	07:00	590	4094	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
41	2014	2015	17/12/2014	07:00	268	1226	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
42	2015	2016	22/01/2016	07:00	550	3665	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
43	2016	2017	17/12/2016	17:00	415	2364	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
44	2017	2018	08/02/2018	07:00	486	3019	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
45	2018	2019	02/01/2019	07:00	317	1572	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave
46	2019	2020	27/01/2020	17:00	682	5155	DL/Vazão gerada a partir da curva-chave

DL – Cotas de dupla leitura (07 e 17 h) – horário de Brasília

M – Vazão gerada a partir da cota média da dupla leitura (07 e 17 h)

* – Cota máxima das estatísticas de cotas médias brutas do sistema de gerenciamento de dados hidrometeorológicos (HIDRO) fornecido pela ANA. A cota máxima registrada nas estatísticas refere-se à cota máxima entre as leituras de 07 e 17 h

ANEXO III

Curvas-chave

As vazões da série histórica foram calculadas com a equação da curva-chave de formato potencial:

$$Q(h) = a (h - h_0)^n \quad (\text{AIII-01})$$

Onde:

h é a cota a qual se quer calcular a vazão (m);

$Q(h)$ é a vazão calculada para a cota h (m³/s);

a , n e h_0 são parâmetros a serem determinados.

Os parâmetros das curvas-chaves utilizadas no estudo e disponibilizadas pela CPRM são os seguintes:

Curva-chave	Período	Parâmetros			Amplitude de Cotas (cm)	
		a	h_0 (m)	n	Mín.	Máx.
Ramo 1	01/07/1972 - 14/06/1974	167,2104	-0,41	1,750	100	141
Ramo 2		249,4217	-0,09	1,600	141	216
Ramo 3		176,3142	-0,47	1,700	216	550
Ramo 1	15/06/1974 - 07/03/1979	199,1043	-0,43	1,600	60	218
Ramo 2		176,3142	-0,47	1,700	218	940
Ramo 1	08/03/1979 - 12/01/1986	167,2104	-0,41	1,750	80	141
Ramo 2		249,4217	-0,09	1,600	141	216
Ramo 3		176,3142	-0,47	1,700	216	750
Ramo 1	13/01/1986 - 30/09/2009	199,1043	-0,43	1,600	50	218
Ramo 2		176,3142	-0,47	1,700	218	850
Ramo 1	01/10/2009 - 31/12/2021	174,3750	-0,35	1,270	0	60
Ramo 2		177,3520	-0,35	1,600	60	148
Ramo 3		235,2990	-0,05	1,610	148	394
Ramo 4		177,2640	-0,44	1,700	394	850

ANEXO III

Vídeos na INTERNET registrando alguns grandes eventos de cheia:

Dezembro/2011: <https://www.youtube.com/watch?v=izwT4ltSiqo>
 Janeiro/2012: <https://www.youtube.com/watch?v=9CpfEu-5p3o>
 Janeiro/2013: <https://globoplay.globo.com/v/2376087/>
<https://www.youtube.com/watch?v=qSGBru735oc>
 Fevereiro/2013: <https://globoplay.globo.com/v/2393287/>
<https://globoplay.globo.com/v/2394617/>
 Janeiro/2020: <https://www.youtube.com/watch?v=FvkdX6JFEDc>

Estatísticas da série de Máximos por ano hidrológico (01/Out a 30/Set)

Estatísticas da série

Média m ³ /s	Desvio-Padrão m ³ /s	Máximo m ³ /s	Mínimo m ³ /s	Amplitude m ³ /s	Assimetria	Mediana m ³ /s
3283,4	1437,7	8582,8	1226,5	7356,3	1,7	3085,4

1º Quartil m ³ /s	3º Quartil m ³ /s	AIQ m ³ /s
2206,330	3880,898	1674,568

Estatísticas da Série Transformada: Ln (X)

Média m ³ /s	Desvio-Padrão m ³ /s	Máximo m ³ /s	Mínimo m ³ /s	Amplitude m ³ /s	Assimetria	Mediana m ³ /s
8,01667	0,39653	9,05751	7,11195	1,94556	0,30388	8,03440

1º Quartil m ³ /s	3º Quartil m ³ /s	AIQ m ³ /s
7,69909	8,26329	0,56421

Momentos-L e Razões-L

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
3283,4484	746,5493	0,2274	0,2541	0,2168

Função Acumulada de Probabilidade da GEV está apresentada no Anexo II

Inversa da distribuição da GEV também está descrita no Anexo II.

Parâmetros da Distribuição GEV

Distribuição	Posição (ξ)	Escala (α)	Forma (k)
GEV (ξ, α, k)	2603,755	943,494	-0,127



Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras

Análise de Frequência de Vazões dos Sistemas de Alerta

ENDEREÇOS

Sede

SGAN- Quadra 603 – Conjunto J – Parte A – 1º andar
Brasília – DF – CEP: 70830-030
Tel: 61 2192-8252
Fax: 61 3224-1616

Escritório Rio de Janeiro

Av Pasteur, 404 – Urca
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22.290-255
Tel: 21 2295-5337 – 21 2295-5382
Fax: 21 2542-3647

Superintendência Regional de Belo Horizonte

Av. Brasil, 1.731 - Funcionários
Belo Horizonte – MG – CEP: 30.140-002
Tel.: 31 3878-0376
Fax: 31 3878-0383

Residência de Fortaleza

Rua Rodrigues Júnior, 840 – Centro
Fortaleza – CE – CEP: 60.060-000
Tel.: 85 3878-0200
Fax: 85 3878-0240