



REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

**ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE VAZÕES MÁXIMAS E A
DEFINIÇÃO DAS COTAS PARA INSTALAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS AUTOMÁTICOS NA
REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL DE REFERÊNCIA (RHNR)**

**Rio: Piancó
Estação Fluviométrica: Pau Ferrado
Código: 37380000
Município: Pombal - PB**

**Recife
2024**

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL

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 MÁXIMAS E A DEFINIÇÃO
DAS COTAS PARA INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS
AUTOMÁTICOS NA REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL DE
REFERÊNCIA (RHNR)

Rio: Piancó

Estação Fluviométrica: Pau Ferrado

Código: 37380000

Município: Pombal - PB

Múcio Valença Virões
Eber José de Andrade Pinto



Recife

2024

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

MINISTRO DE ESTADO

Alexandre Silveira de Oliveira

SECRETARIA NACIONAL DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

Vítor Eduardo de Almeida Saback

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Inácio Cavalcante Melo Neto

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Francisco Valdir Silveira

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Sabrina Soares de Araújo Gois

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Hidrologia

Andrea de Oliveira Germano

Chefe da Divisão de Hidrologia Aplicada

Emanuel Duarte Silva

Achiles Monteiro (*in memoriam*)

Chefe do Departamento de Gestão Territorial

Diogo Rodrigues Andrade da Silva

Chefe da Divisão de Geologia Aplicada

Tiago Antonelli

Coordenação Executiva do DEHID - Projeto Regionalização de Vazões

Eber José de Andrade Pinto

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE RECIFE

Superintendente

Hortência Maria Barboza de Assis

Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial

Robson de Carlo da Silva

Gerente de Geologia e Recursos Minerais

Felipe José da Cruz Lima

Gerente de Infraestrutura Geocientífica

Douglas Silva Luna

Gerente de Administração e Finanças

Omar Jose Evangelista de Barros

REALIZAÇÃO

Superintendência Regional de Recife

AUTORES

Múcio Valença Virões – SUREG/RE

Eber José de Andrade Pinto – SUREG/BH

EQUIPE EXECUTORA

Denise Christina de Rezende Melo – SUREG/GO

Francisco Fernando Noronha Marcuzzo – SUREG/PA

Múcio Valença Virões – SUREG/RE

Paula Krsthina Cordeiro Freire – REFO

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E MAPA

Janaína Marise França de Araújo – SUREG/RE

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Nelma Fabrícia da P. Ribeiro Botelho – SUREG/RE

Ficha Catalográfica

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

V813p Virões, Múcio Valença.

Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: análise de frequência de vazões máximas e a definição das cotas para instalação de equipamentos automáticos na rede hidrometeorológica nacional de referência (RHNR): rio Piancó estação fluviométrica Pau Ferrado, código 37380000, município Pombal-PB / Múcio Valença Virões, Eber José de Andrade Pinto. – Recife: Serviço Geológico do Brasil, 2024.

1 recurso eletrônico: PDF

Ação levantamentos, estudos, previsão e alerta de eventos hidrológicos críticos.

ISBN 978-65-5664-516-2

1. Hidrologia. 2. Vazões naturais. 3. Bacias hidrográficas.

I. Título.

CDD 551.48

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Teresa Rosenhayme CRB / 7 5662

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM

Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

Serviço Geológico do Brasil - CPRM

www.sgb.gov.br

<https://rigeo.sgb.gov.br>

seus@sgb.gov.br

APRESENTAÇÃO

O projeto Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras é uma iniciativa dentro do programa de Gestão de Riscos e Resposta a 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 igualda 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 e a recomendação de cotas (níveis) para instalação de equipamentos automáticos no rio Piancó especificamente na estação fluviométrica Pau Ferrado, código 37380000. Esta estação fluviométrica faz parte Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) e constitui um ponto de acompanhamento das vazões e cotas nesta região, no Estado da Paraíba.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	01
2 – METODOLOGIA	06
2.1 – Análise de Frequência Local	06
2.2 – Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência	08
3 – RESULTADOS	12
3.1 – Análise de Frequência Local	12
3.2 – Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência	13
4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	16
5 – REFERÊNCIAS	18
ANEXO I	20
ANEXO II	24
ANEXO III	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização das estações fluviométricas da RHNR.	02
Figura 02 – Localização da estação fluviométrica de Pau Ferrado.	03
Figura 03 – Perfil da seção transversal da seção de réguas de Pau Ferrado. ...	05
Figura 04 – Ajuste das distribuições empírica e teórica.	12
Figura 05 – Cota mínima de instalação de equipamentos.	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Vazões em m ³ /s.	08
Tabela 02 – Riscos Hidrológicos.	10
Tabela 03 – Probabilidade de não ocorrer ao menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil.	10
Tabela 04 – Critérios para instalação dos equipamentos da RHNR.	11
Tabela 05 – Vazões em m ³ /s.	13
Tabela 06 – Cotas para instalação dos equipamentos da estação fluviométrica.	14

ANEXOS

- Anexo I – Ficha Descritiva da Estação Fluviométrica
- Anexo II – Distribuições de Gumbel e Log-normal
- Anexo III – Dados utilizados e as estatísticas

1 – INTRODUÇÃO

O estudo das águas superficiais é fundamental para adequada gestão dos recursos hídricos. Para que isto ocorra se faz necessário a implantação de uma rede de monitoramento hidrológico que seja eficiente e capaz de fornecer informações necessárias aos usos múltiplos das águas fluviais.

Conforme Maranhão e Pereira (2017), as primeiras iniciativas institucionais do estabelecimento da Rede Hidrometeorológica Nacional – RHN, início do século XX, ocorrem através do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalando as primeiras estações no Brasil. Em 1934 o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) estende a atuação hidrológica pelo país. Em 1960 é criado o Departamento Nacional de Águas e Energia (DNAE) que recebe, entre suas atribuições, as atividades de hidrologia nacional. Porém em 1969, com novas competências relacionadas ao setor elétrico, passa a se chamar Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). Também neste ano surge a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), através do Decreto-Lei nº 764, de 15 de agosto de 1969, absorvendo a atividade de manutenção e operação da RHN sob responsabilidade do DNAEE. Em 28 de dezembro de 1994, pela Lei nº 8.970, a CPRM passa a ser uma empresa pública, com funções de Serviço Geológico do Brasil (SGB).

Assim nasce a parceria entre a Agência Nacional de Águas (ANA), criada através da Lei nº 9.984/2000, art.4, inciso 13, e o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), principal parceiro no planejamento, gerenciamento e operação da RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional, através do Acordo de Cooperação Técnica – ACT nº 003/2014, com o intuito de revitalizar a capacitação técnica dos profissionais envolvidos e revisar a rede de monitoramento existente no Brasil.

Em agosto de 2015, ANA e SGB/CPRM firmaram um Memorando de Entendimento com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, *United States Geological Survey*) dedicado à capacitação técnica dos seus profissionais. E a partir deste evento, foi definido pelos especialistas envolvidos a revisão da rede existente, construindo uma Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência – RHNR para atender com excelência as demandas da gestão de recursos hídricos brasileira, promovendo dados confiáveis e representativos. Esta rede deverá atender os interesses da União a partir de 06 objetivos gerais: Transferência e compartilhamento Interestaduais e Internacionais, eventos hidrológicos críticos, balanços e disponibilidades hídricas, mudanças e tendências de longo prazo, qualidade da água e regulação dos recursos hídricos.

A localização das 33 estações fluviométricas que compunham a RHNR em 2022 sob a responsabilidade da Superintendência Regional do Recife (SUREG-RE) está apresentada na Figura 01.

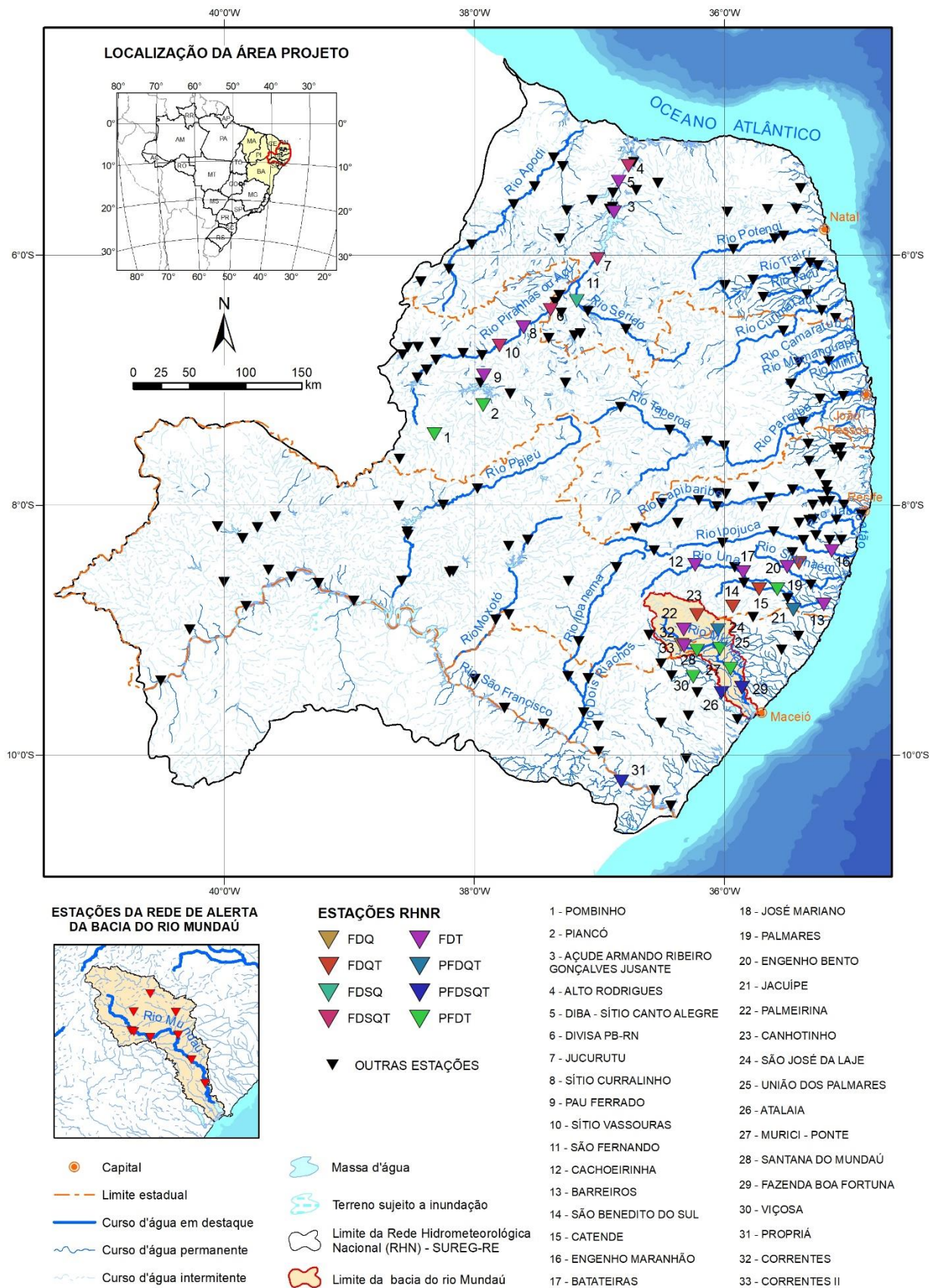


Figura 01 – Localização das estações fluviométricas da RHNR em 2022. Fonte: elaborado pela equipe do projeto.

A estação de Pau Ferrado, código 37380000, está localizada na Latitude $06^{\circ}57'57''S$ e Longitude $37^{\circ}55'27''O$, no rio Piancó e possui uma área de drenagem de 8.580 km². O Rio Piancó nasce entre as Serras de Arara e de Pedra, no Município de Conceição, Estado da Paraíba, numa altitude de 600,0 m. É intermitente e forma o açude Mãe D'Água (Coremas), antes da sua confluência com o rio Piranhas. Não possui afluente importante, com exceção de pequenos riachos. A estação fluviométrica está instalada na margem direita do rio Piancó, na localidade de Pau Ferrado-PB, em uma Fazenda, à jusante do açude Coremas, e sua seção de medição fica à 500 m a jusante da seção de réguas, e ainda sofre influência desta barragem. A Figura 02 ilustra a localização da estação de Pau Ferrado.

Desde março de 1966 existem réguas linimétricas instaladas para realização de duas leituras diárias pelo observador dos níveis do rio Mundaú, as 07 e as 17 h.

Nesta estação, desde novembro de 2017, estão instalados equipamentos automáticos para registro contínuo e transmissão dos níveis do rio Piancó.

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 as cotas da estação. Maiores detalhes sobre a estação podem ser encontrados na sua ficha descritiva que consta do Anexo 01.

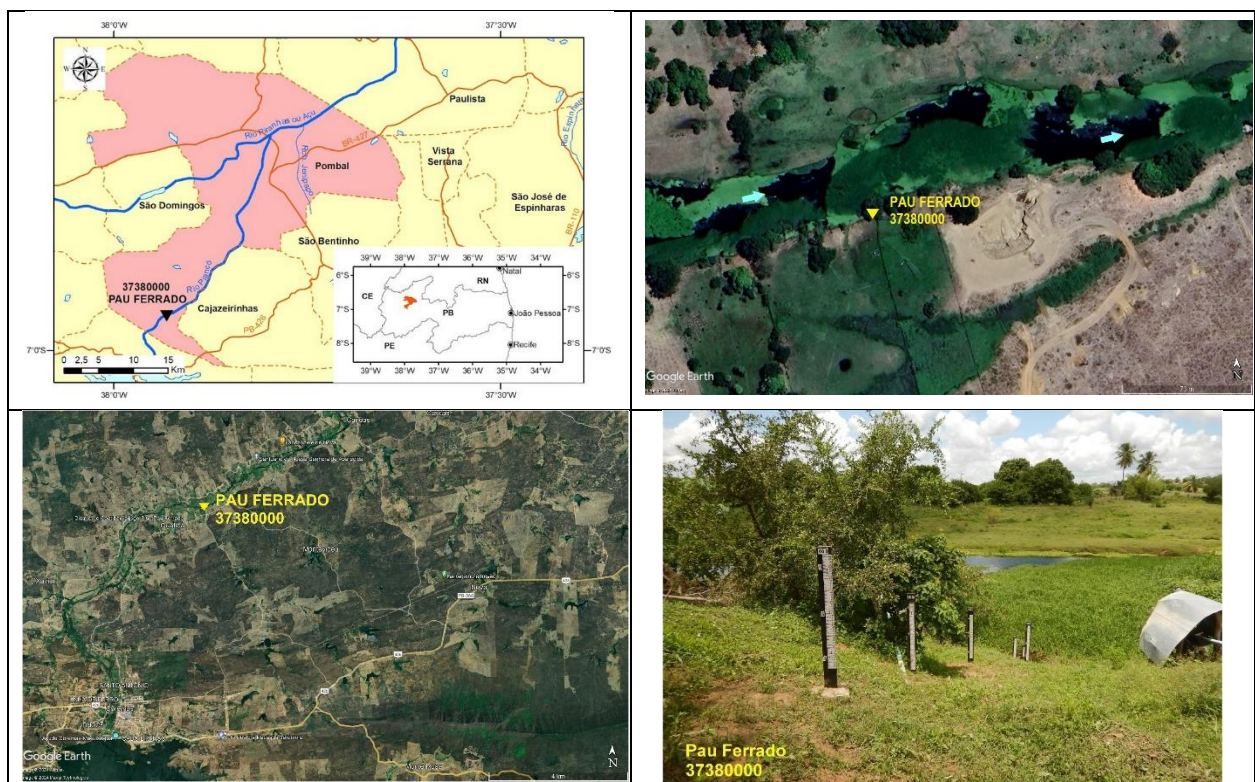


Figura 02 – Localização da estação fluviométrica de Pau Ferrado. Fonte: Equipe do projeto, Google Earth (2024) e arquivo fotográfico do Projeto da RHN.

A Figura 03 apresenta o perfil da seção transversal na seção de réguas da estação. Esta figura apresenta as medições simultâneas de vazões e cotas realizadas entre março/1976 e outubro/2021 e a máxima cota observada (640 cm 03/04/2008).

A diferença entre a máxima cota com vazão medida (267 m³/s na cota 401 cm) e a máxima cota observada nas réguas é de 239 cm. No Anexo III observa-se que a série de cotas máximas por ano hidrológico apresenta 40 valores máximos, sendo 09 destes superiores a 401 cm (cota da vazão máxima medida). A razão entre a cota máxima observada e a cota máxima com medição de vazão é 1,60 (640 cm / 401 cm). Segundo Tucci (2002), a melhor curva-chave, aquela com menor extrapolação do ramo superior, possui a razão entre as cotas máximas observadas e com medição de vazão inferior a 1,25. Na Figura 03 também se observa baixa densidade de medições de vazões no intervalo entre 100 e 300 m³/s. A seção de medição está localizada 500 m a jusante da seção de réguas, como está apresentado na ficha descritiva da estação no Anexo I. A estação apresenta área de drenagem de 8.580 km².

As características mencionadas no parágrafo anterior criam dificuldades a extrapolação do ramo superior da curva-chave e ampliam a incerteza na estimativa das vazões a partir das cotas superiores a 401 cm. Todavia, 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.

A não alteração da cota do zero da régua, a ausência de mudanças significativas na geometria do trecho onde está instalada a estação fluviométrica, associada às incertezas da estimativa das vazões em cotas altas citadas anteriormente e, também, ao fato de 22,5% da série de cotas máximas por ano hidrológico estar no ramo extrapolado da curva-chave, sugere que o estudo poderia ser realizado através da análise da frequência de cotas.

Entretanto, a análise através da frequência de vazões foi considerada a melhor opção devido à manutenção desse estudo, pois as estações da RHNR podem sofrer deslocamentos para uma outra posição posteriormente. A reinstalação de réguas em outra seção, afastada do original, pode modificar a relação entre cota e vazão no ramo superior, afetando a análise de frequência de cotas máximas.

No entanto é importante frisar que tais modificações não afetarão a análise de frequência de vazões deste estudo, se estas alterações não gerarem significativos incrementos ou decréscimos na área de drenagem da estação associadas a grandes variações de vazões para um mesmo evento hidrológico, ou ainda outras modificações impactantes nas condições hidrológicas atual da estação. Nestes casos de modificações significativas se tratará de uma nova estação, o que demandará uma nova série histórica para um novo estudo de análise de frequência de máximas.

37380000 - PAU FERRADO em POMBAL-PB
Seção Transversal - Seção de Réguas

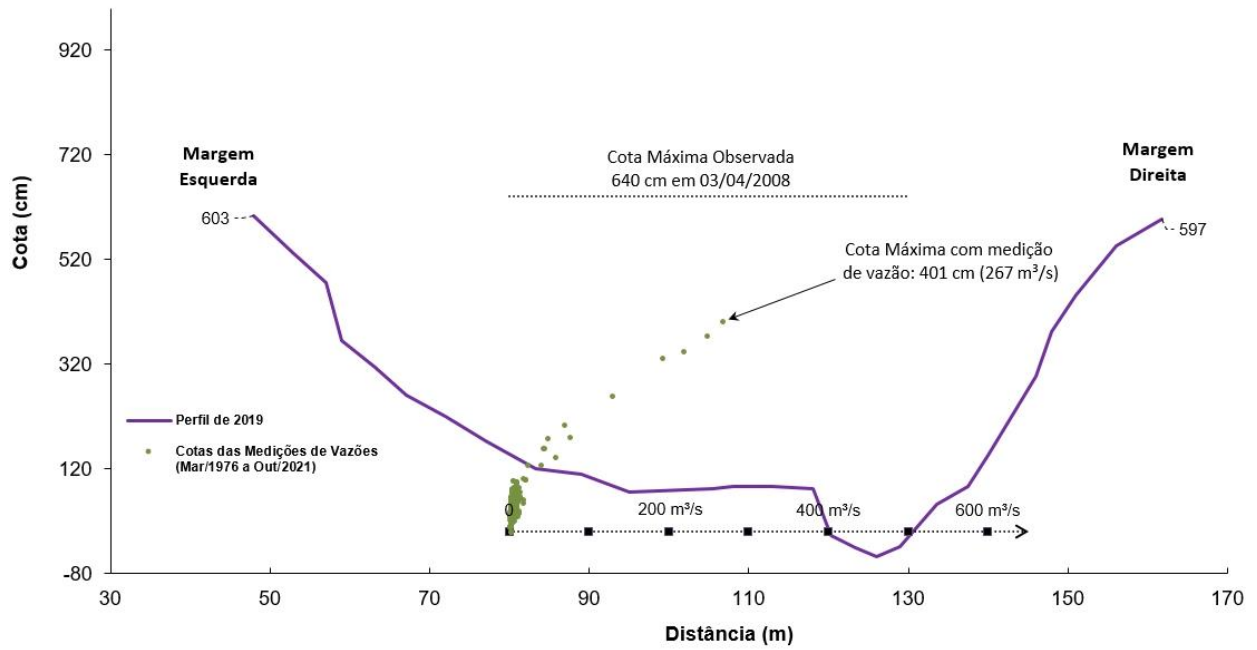


Figura 03 – Perfil da seção transversal da seção de régua de Pau Ferrado. Fonte: elaborado pelos autores.

2 – METODOLOGIA

2.1 – 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-chaves; 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 e Pinto, 2007, página 39), e com o teste de Grubbs e Beck (Naghettini e Pinto, 2007, página 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), página 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), página 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), página 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. Nos estudos de análise de frequência local de máximos por ano hidrológico do projeto de Regionalização são adotadas as distribuições candidatas de 02 parâmetros conforme recomendação de Hosking e Wallis (1997). As distribuições candidatas são as distribuições de Gumbel e Log-Normal.

- Calcular os parâmetros das distribuições teóricas de probabilidades candidatas.

A estimativa dos parâmetros das distribuições candidatas é efetuada pelo método dos momentos-L (Hosking e 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), páginas de 275 a 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.

2.2 – Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência

Segundo o relatório Maranhão e Pereira (2017), a implantação da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) buscará atender os interesses da União agrupados em 6 (seis) objetivos gerais. A Tabela 01 apresenta estes objetivos.

Tabela 01 – Objetivos Gerais da RHNR

Nº	Objetivos Gerais
1	Transferências e Compartilhamentos Interestaduais e Internacionais
2	Eventos Hidrológicos Críticos
3	Balancos e disponibilidades hídricas
4	Mudanças e tendências de longo prazo
5	Qualidade da água
6	Regulação dos Recursos Hídricos

Fonte: elaborado pelos autores.

A locação e instalação de uma estação fluviométrica que comporá uma rede deverá atender vários critérios como os descritos em Maranhão e Pereira (2017), World Meteorological Organization (2010), Sauer e Turnipseed (2010), ANA-SGB (2021), Kenney (2010) e Rantz *et al.* (1982). Em relação a instalação de equipamentos automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) o relatório da Maranhão e Pereira (2017), apresenta os seguintes critérios em relação ao posicionamento dos equipamentos:

Página 27 do arquivo PDF

“...A cota máxima é importante para a posição ideal da PCD, das referências de níveis - RNs e das quantidades de lances de réguas a serem instaladas na futura estação. ...”

Página 33 do arquivo PDF

“...73. Sobre o abrigo da PCD.

Deve estar localizada acima do nível de cheia; ...”

Além de Maranhão e Pereira (2017), destacam-se World Meteorological Organization (2010) e Sauer e Turnipseed (2010) como referências que tratam sobre este tema de locação de estação fluviométrica e posicionamento de equipamentos.

World Meteorological Organization (2010) sugere os seguintes critérios para posicionamento de equipamentos em uma estação fluviométrica: “...

- **Os instrumentos, abrigo e outra edificação devem estar acima de todos os níveis de inundação registrados. Sensores de nível devem permitir tanto a medição de inundações como de secas. ...**

Em relação aos níveis altos da água (cotas altas), World Meteorological Organization (2010), além do item acima, também afirma que “...devem ser pesquisadas as marcas de cheia de grandes enchentes do passado, bem como indagado aos moradores locais sobre os níveis de enchentes históricas. Essas informações deverão ser utilizadas pelo engenheiro para tomar uma decisão sobre a elevação na qual o

registrador de níveis (cotas) deve ser instalado para ficar acima de quaisquer enchentes que provavelmente ocorrerão no futuro. O abrigo do registrador deve ser instalado de forma a ser protegido de detritos transportados durante grandes enchentes. Também devem ser pesquisadas evidências sobre grandes mudanças no curso d'água, incluindo erosão e deposição nas margens que ocorreram durante enchentes notáveis do passado. Essas evidências, se encontradas, dão alguma indicação de mudanças que podem ser esperadas na ocorrência de grandes enchentes do futuro..." (Tradução livre).

Sauer e Turnipseed (2010) sugerem vários critérios para a escolha do local de instalação uma nova estação fluviométrica que fará parte da *USGS National Streamflow Information System (NSIP)*. Em relação ao posicionamento de equipamentos faz as seguintes menções: "...

- O poço tranquilizador, por exemplo o tubulão do linígrafo (se usado), e o abrigo do instrumento registrador dos níveis dá água (cotas) podem estar localizados em uma margem do curso d'água, ponte, represa ou outra estrutura adequada, desde que os outros critérios de seleção do local sejam atendidos. **Não instale a estrutura que abrigará os equipamentos registradores de nível (cota) onde ela possa sofrer danos durante enchentes.**
- ...
- **O abrigo de instrumentos deve ser instalado em uma cota alta o suficiente para estar acima do nível de inundação de 0,5% de excedência (200 anos), se possível. ...**

Analisando as recomendações de World Meteorological Organization (2010), Sauer e Turnipseed (2010) e Maranhão e Pereira (2017) fica claro a preocupação com o posicionamento dos equipamentos de forma a garantir a medição dos níveis (cotas) dos grandes eventos de cheias. Sauer e Turnipseed (2010) se diferenciam de World Meteorological Organization (2010) e Maranhão e Pereira (2017) ao definir que os equipamentos devem ser instalados, se possível, em uma cota alta o suficiente para estar acima do nível de inundação de 0,5% de excedência (200 anos), ou seja, um critério objetivo.

Ao se adotar um tempo de retorno, T , como referência na definição do nível mínimo para instalação dos equipamentos também se assume uma probabilidade de que pelo menos um evento igual ou superior a cheia de T anos possa ocorrer em n anos de vida útil. Essa probabilidade é o risco hidrológico, $R = 1 - [1 - (1/T)]^n$. No caso de uma estação fluviométrica, a vida útil é número de anos de operação. A Tabela 02 apresenta os riscos hidrológicos associados aos tempos de retorno de 100, 200 e 250 anos para diferentes vidas uteis.

Tabela 02 – Riscos Hidrológicos

T (anos)	“Vida Útil “, n anos de operação da estação fluviométrica								
	20	30	50	69	100	138	173	200	250
100	18,2%	26,0%	39,5%	50,0%	63,4%	75,0%	82,4%	86,6%	91,9%
200	9,5%	14,0%	22,2%	29,2%	39,4%	49,9%	58,0%	63,3%	71,4%
250	7,7%	11,3%	18,2%	24,2%	33,0%	42,5%	50,0%	55,1%	63,3%

Fonte: elaborado pelos autores.

Quando o risco hidrológico supera 50%, a probabilidade de ocorrer pelo menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil é maior que a probabilidade de não ocorrer pelo menos uma vez tal evento. Observa-se na Tabela 02, que o risco hidrológico para eventos de 100 anos de tempo de retorno passa a ser superior a 50% quando a vida útil é maior que 69 anos. No caso de eventos de 200 anos de tempo de retorno, o risco hidrológico será maior que 50% quando a vida útil superar 138 anos e, 173 anos no caso de tempo de retorno de 250 anos.

De forma inversa, a Tabela 03 apresenta as probabilidades de não ocorrer ao menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil.

Tabela 03 – Probabilidade de não ocorrer ao menos um evento igual ou superior a cheia de T anos em n anos de vida útil

T (anos)	“Vida Útil “, n anos de operação da estação fluviométrica								
	20	30	50	69	100	138	173	200	250
100	81,8%	74,0%	60,5%	50,0%	36,6%	25,0%	17,6%	13,4%	8,1%
200	90,5%	86,0%	77,8%	70,8%	60,6%	50,1%	42,0%	36,7%	28,6%
250	92,3%	88,7%	81,8%	75,8%	67,0%	57,5%	50,0%	44,9%	36,7%

Fonte: elaborado pelos autores.

Baseando-se nas recomendações de World Meteorological Organization (2010), Sauer e Turnipseed (2010) e Maranhão e Pereira (2017), considerando os objetivos gerais da RHN, bem como, a ocorrência das grandes cheias no Brasil, como por exemplo as enchentes de 2010 no rio Mundaú e em maio de 2024 no Rio grande do Sul e com o objetivo de garantir a medição dos níveis (cotas) dos grandes eventos de cheias que podem ocorrer no futuro, sugere-se os critérios apresentados na Tabela 04 para definição da cota mínima para instalação dos equipamentos da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR).

Tabela 04 – Critérios para instalação dos equipamentos da RHNR

Objetivos gerais	CRITÉRIO – Considerando o objetivo da estação fluviométrica, instalar os equipamentos de registro de níveis na maior cota entre as opções.
Transferências e Compartilhamentos Interestaduais e Internacionais ¹	A cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Eventos Hidrológicos Críticos ²	A cota associada a cheia de 250 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Balanços e disponibilidades hídricas ³	A cota associada a cheia de 100 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Mudanças e tendências de longo prazo ¹	A cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Qualidade da água ¹	A cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)
Regulação dos Recursos Hídricos ³	A cota associada a cheia de 100 anos de tempo de retorno, ou a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)

1-O registro de grandes cheias é importante para garantir o atendimento dos objetivos, bem como, preservar os equipamentos caros dos efeitos deletérios da passagem de uma enchente.

2-Os eventos críticos da bacia do rio Mundaú em 2010 e de maio de 2024 no Rio grande do Sul ensinaram a importância de não se perder os equipamentos na passagem de eventos raros.

3-O atendimento dos objetivos não será significativamente prejudicado se houver a perda do registro da passagem de eventos de grandes cheias.

Fonte: elaborado pelos autores.

3 – RESULTADOS

3.1 – Análise de Frequência Local

A análise de frequência local das vazões do rio Piancó em Pau Ferrado, código 37380000, foi efetuada utilizando a série de vazões máximas por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez) apresentadas no Anexo III. A distribuição de frequência selecionada foi a Log-Normal, com os parâmetros calculados pelo método dos momentos-L e também apresentados no Anexo III. As duas distribuições candidatas não foram rejeitadas pelo teste de aderência. A distribuição Log-Normal foi selecionada por apresentar menor desvio padrão dos resíduos entre a distribuição empírica e a teórica. A Figura 04 apresenta o gráfico com as distribuições empírica e teórica ajustadas.

A inversa da distribuição Log-Normal é a calculada da seguinte forma:

$$x_T = EXP(\mu + \sigma \cdot Z_{(1-1/T)}) \quad (01)$$

Onde:

T é o tempo de retorno (anos)

x_T é o quantil associado a tempo de retorno, T

$Z_{(1-1/T)}$ é o valor da variável normal padrão associada a probabilidade $(1 - 1/T)$. Pode ser obtida em tabelas ou empregando métodos numéricos para inverter $\Phi(x)$ apresentada no Anexo II.

μ é o parâmetro de posição (4,3343)

σ é o parâmetro de escala (1,2435)

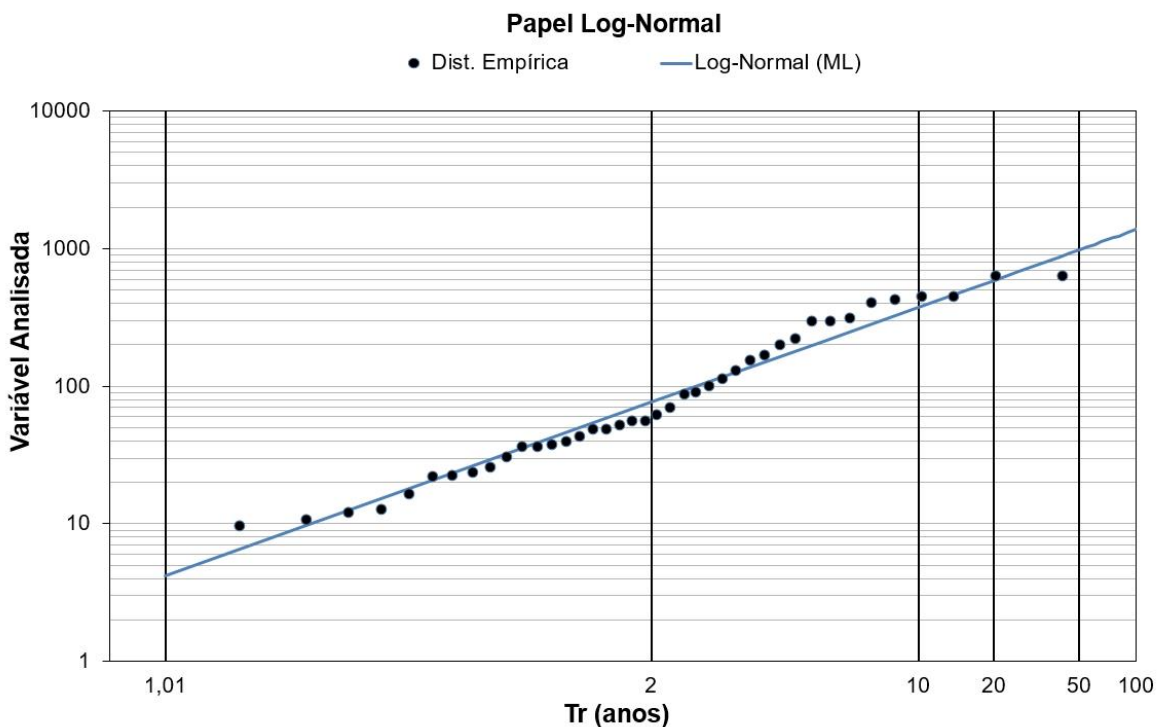


Figura 04 – Ajuste das distribuições empírica e teórica. Fonte: elaborado pelos autores.

A equação 01 permite o cálculo das vazões associadas a diferentes tempos de retorno. A Tabela 05 apresenta as vazões associadas a diferentes tempos de retorno.

Tabela 05 – Vazões em m³/s.

Vazões (m ³ /s)	Tempo de Retorno, T (anos)											
	10	15	20	25	30	50	75	90	100	150	200	250
	375	493	590	673	746	981	1200	1310	1376	1655	1877	2064

Fonte: elaborado pelos autores.

3.2 – Definição das Cotas para Instalação de Equipamentos Automáticos na Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência

Após o cálculo das vazões associadas a diferentes tempos de retorno é possível estimar as respectivas cotas invertendo a curva chave da estação fluviométrica.

As vazões da série histórica foram calculadas com a equação da curva-chave de formato potencial como apresentada no Anexo III.

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

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 de ajustes.

A inversa da equação da curva chave é a seguinte:

$$h = \left(\frac{Q}{a}\right)^{1/n} + h_0 \quad (02)$$

Os parâmetros das curvas chave de diferentes períodos e amplitudes de cotas encontram-se no Anexo III.

Os critérios para definição das cotas mínimas de instalação dos equipamentos da RHNR, dependendo do objetivo da estação fluviométrica, estão apresentados na Tabela 04. Um critério comum a todos os objetivos das estações fluviométricas é “a cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)”.

A cota máxima observada na estação de Pau Ferrado, código 37380000, foi de 640 cm. A vazão associada a esta cota é de 640 m³/s como calculado no item 4-Exemplos de Aplicação.

Os outros critérios apresentados na Tabela 04 são as cotas associadas as cheias de 100, 200 e 250 anos de tempo de retorno. Estas vazões foram calculadas como ilustrado no item 4-Exemplos de Aplicação e os valores constam da Tabela 05. O cálculo

das cotas associadas a estas vazões é realizado empregando a equação (02) e adotando os parâmetros da curva chave mais recente apresentados no Anexo III.

Analisando o Anexo III observa-se que a curva chave mais recente tem período de validade de 07/10/2021 a 31/12/2021 e o ramo superior da curva chave tem uma amplitude de cotas de 104 a 500 cm. Mesmo estendendo o período de validade da curva chave, a amplitude de cotas inviabiliza a estimativa das cotas associadas as vazões de 100, 200 e 250 anos de tempo de retorno uma vez que a vazão associada a maior cota observada é inferior a de 100 anos de tempo de retorno como ilustra o item 4-Exemplos de Aplicação.

A Tabela 06 resume os critérios de definição da cota mínima para instalação dos equipamentos da estação de Pau Ferrado, código 37380000.

Tabela 06 – Cotas para instalação dos equipamentos da estação fluviométrica

CRITÉRIO	Q (m³/s)	Cota (cm)
Cota associada a cheia de 100 anos de tempo de retorno	1376	*
Cota associada a cheia de 200 anos de tempo de retorno	1877	*
Cota associada a cheia de 250 anos de tempo de retorno	2064	*
Cota da maior cheia registrada acrescida de 1,0m (um metro)	*	740 cm (640 cm + 100 cm)

*A amplitude de cotas das curvas chave não permite a estimativa.

Fonte: elaborado pelos autores.

A ficha descritiva da estação que se encontra no Anexo I não apresenta o objetivo ou objetivos da estação fluviométrica. **Sendo assim, com as informações disponíveis na elaboração deste relatório, sugere-se, para o momento, que a cota de instalação dos equipamentos seja superior a 740 cm. A Figura 05 ilustra o posicionamento dos equipamentos na seção de régua da estação.**

A Figura 05 apresenta o perfil da seção transversal de régua levantada em 2019 com cota máxima de 603 cm. Todavia, entre perfis de seção de régua levantados em anos anteriores a cota máxima foi de 619 cm em 2002. Assim recomenda-se que os perfis anuais sejam levantados em cotas superiores à da maior cheia observada acrescida de 1,0m, 740cm (640cm + 100cm), nas duas margens, pois auxiliará na extrapolação do ramo superior da curva chave.

Além disso, mesmo com as dificuldades inerentes ao trabalho de operação de uma rede hidrometeorológica, quando houver uma oportunidade, ou seja, a ocorrência de cheias no rio Piancó, recomenda-se uma intensificação nas medições de vazões em cotas superiores a 401 cm para melhorar a extrapolação do ramo superior da curva chave.

Como indicado no relatório Maranhão e Pereira (2017), também se sugere que seja incluído na ficha descritiva os objetivos da estação fluviométrica de Pau Ferrado, código 37380000.

37380000 - PAU FERRADO em POMBAL-PB
Seção Transversal - Seção de Réguas

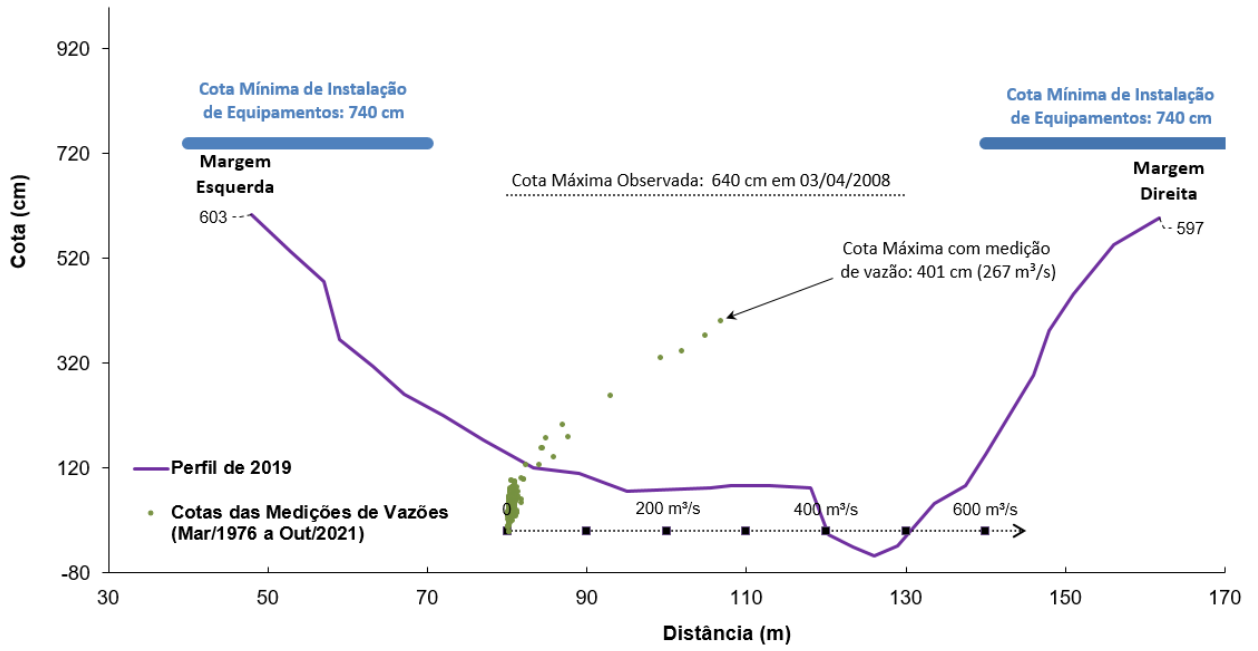


Figura 05 – Cota mínima de instalação de equipamentos. Fonte: elaborado pelos autores.

4 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

- a) O rio Piancó em Pau Ferrado, código 37380000, alcançou a cota de 640 cm durante a cheia em 03/04/2008. Qual é o tempo de retorno da vazão associada a esta cota?

Resp: Inicialmente, será necessário calcular a vazão associada à cota de 640 cm com a curva-chave válida para a data de 03/04/2008 utilizando a equação AIII-01 (Anexo III) com amplitude de cotas de 108 a 650 cm.

Para a cota 640 cm os parâmetros são $a = 34,2133$, $h_0 = 0,36$ m e $n = 1,629$ (Anexo III). Dessa forma temos:

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

$$Q(1238\text{cm}) = 34,2133 (640/100 - 0,36)^{1,629}$$

$$Q(640\text{cm}) = 640,48 \text{ m}^3/\text{s}$$

Numa segunda etapa, para se calcular o tempo de retorno será necessário estimar a variável Normal Padrão da equação 01. Dessa forma temos:

$$Z_{(1-1/T)} = \frac{(\ln(x_T) - \mu)}{\sigma} \quad (02)$$

A vazão calculada foi de $640,48 \text{ m}^3/\text{s}$, o parâmetro de posição é $\mu = 4,3343$, e o de escala é $\sigma = 1,2435$. Substituindo os valores na equação 02 temos:

$$Z_{(1-1/T)} = \frac{(\ln(x_T) - \mu)}{\sigma} = \frac{(\ln(640,48) - 4,3343)}{1,2435} = 1,7112$$

Levando o valor 1,7112 em uma tabela de inversa da distribuição Normal Padrão ou executando a função DIST.NORMP.N do Excel obtém-se: $P(Z \leq 1,7112) = 0,95648$.

O tempo de retorno será:

$$T = \frac{1}{1 - P(Z \leq z)} = \frac{1}{1 - 0,95648} = 23 \text{ anos}$$

O tempo de retorno de 23 anos corresponde à probabilidade de 4,35% da vazão $640,48 \text{ m}^3/\text{s}$ (associada à cota 640 cm) ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 640,48 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{23} 100 = 4,35 \%$$

- b) Qual é o tempo de retorno da vazão associada à maior cota registrada com medição de vazão em Pau Ferrado, código 37380000?

Resp: A maior cota registrada com medição de vazão em Pau Ferrado, código 37380000, é 401 cm / 267m³/s (30/04/2009). Considerando a curva-chave desta data e substituindo esta cota na equação AIII-01 (Anexo III), obtém-se a vazão de 282 m³/s (Ramo 02). Com a vazão calculada e os parâmetros da distribuição de Log-Normal a partir da equação 02 se obtém $Z_{(1-1/T)}$ e por consequência $P(Z \leq z)$. Por fim, como no primeiro exemplo, temos que o tempo de retorno da vazão associada à cota de 401 cm é de 6,82 anos. A probabilidade da vazão associada à cota de alerta ser igualada ou superada em um ano qualquer é de 14,65%.

- c) Qual a vazão com tempo de retorno de 100 anos em Pau Ferrado, código 37380000?

Resp: Considerando os parâmetros de posição e de escala da curva de distribuição obtida no estudo (Log-Normal), calcula-se a inversa da distribuição Normal Padrão para $T=100$ anos (INV.NORMP do Excel), obtendo-se $Z_{(1-1/T=0,99)} = 2,326$. Aplicando a equação (01) obtém-se a vazão de 1376 m³/s.

$$x_T = EXP(4,3343 + 1,2435 \cdot 2,326) = 1376 \text{ m}^3/\text{s}$$

O tempo de retorno de 100 anos corresponde à probabilidade de 1,0% da vazão 1376 m³/s ser igualada ou superada em um ano qualquer, ou

$$P(x_T \geq 1376 \text{ m}^3/\text{s}) = \frac{1}{T} 100 = \frac{1}{100} 100 = 1 \%$$

5 – REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Levantamentos topobatimétricos e geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)**. Brasília, DF: ANA: CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22628> . Acesso em: 9 out. 2024.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- KENNEY, T. A. **Levels at gaging stations: section A, Surface-Water Techniques**. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2010. cap. 3., 60 p. (Techniques and Methods 3 – A19). Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/tm/tm3A19/tm3A19.pdf>. Acesso em: 9 out. 2024.
- 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, n. 1, p. 50-60, 1947.
- MARANHÃO, N.; PEREIRA, S. P. (coord.). **Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência – RHNR: relato do planejamento da RHNR e a definição das estratégias de implementação para os próximos anos (5 anos)**. [Brasília]: [CPRM: ANA], 2017. Grupo de Trabalho ANA-CPRM. Portaria ANA n. 151, de 31 de março de 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22172>. Acesso em: 9 out. 2024.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/454>. Acesso em: 9 out. 2024.
- PINTO, E. J. de A. **Atlas pluviométrico do Brasil: metodologia para definição das equações intensidade-duração-frequência do Projeto Atlas Pluviométrico**. Belo Horizonte: CPRM, 2013. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/11560>. Acesso em: 9 out. 2024.
- RANTZ, S. E. *et al.* **Measurement and computation of streamflow: volume 2. Computation of discharge**. Washington: USGS, 1982. v. 2, 631 p. (Geological Survey Water-Supply Paper 2175). Disponível em: https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2175/wsp2175_vol2.pdf. Acesso em: 9 out. 2024.
- SAUER, V. B.; TURNIPSEED, D. P. **Stage measurement at gaging stations**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2010. cap. 3, 45 p. (Techniques and Methods 3–A7). Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/tm3a7.pdf>. Acesso em: 9 out. 2024.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Brasília: ABRH, 2002. 256 p.
- WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 14, n. 4, p. 378-388,

1943. DOI: 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.short>. Acesso em: 9 out. 2024.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on stream gauging**. Geneva: WMO, 2010. v. 1. (Fieldwork WMO-No. 1044). Disponível em:
<https://library.wmo.int/idurl/4/35848>. Acesso em: 9 out. 2024.

ANEXO I
Ficha Descritiva
Estação Fluviométrica de Pau Ferrados, código 37380000

FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

Identificação

Código:	37380000	Estação:	Pau Ferrado	Tipo:	FDQT
Região hidrográfica:	Atlântico Trecho Norte/Nordeste			Sub-bacia:	37
Rio:	Rio Piancó			Bacia local:	Piranhas
Município:	Cajazeirinhas	Estado:	PB	Roteiro:	2
Latitude:	-6.9660	Longitude:	-37.9240	Altitude (m):	170
Instrumento:	GPS	Datum:	WGS 84		
Área de dren. (km²):	8580	Instalada em:	01/03/1966	Extinta em:	
Coordenador:	ANA	Operador:	CPRM/SUREG RE		
Código da folha:	1255	Nome da folha:	POMBAL		
Órgão executor:	SUDENE	Ano:	1972	Escala:	1:100.000

Localização

Margem direita do rio Piancó na localidade de Pau Ferrado, Fazenda do Sr. Damião de Oliveira.

Acessibilidade

De Piancó até a estrada que dá acesso à estação percorre-se 5,0 km pela BR-361, daí mais 39,0 km por estrada cascalhada até a cidade de Coremas, então percorre-se mais 9,0 km em estrada carroçável até Pau Ferrado.

Seção de réguas

Margem: Margem direita

Réguas:

7 Réguas de alumínio graduadas em centímetros, fixadas em suporte de madeira. Lances : 000/100, 100/200, 200/300, 300/400, 400/500, 500/600 e 600/700 cm.

Referências de nível

RN-06: 6092 mm.

RN-07: 5497 mm. Cerca de 3,20 m do lance 500/700 cm.

RN-07: 12240 mm. Na calçada do filho do observador.

Equipe:
Estação: Pau Ferrado

Data: 05/01/2023
Código: 37380000

ANEXO II
Distribuição de Gumbel e Log-Normal.

ANEXO II

DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL

- Função Densidade de Probabilidade

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

α = Parâmetro de escala β = 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

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

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

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

$$\hat{\mu} = \lambda_1 \quad \hat{\sigma} = \lambda_2\sqrt{\pi}$$

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 III
Série de Dados Utilizados – Cotas e Vazões máximas por ano hidrológico
Curva-Chave
Estatísticas da série

ANEXO III

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

Máximos por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez)

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazão (m³/s)	Observações
1	1970	1970	14/03/1970	-	148	30,60	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
2	1971	1971	10/04/1971	-	434	317,05	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
3	1973	1973	02/05/1973	-	410	292,12	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
4	1975	1975	02/05/1975	-	412	295,92	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
5	1977	1977	05/05/1977	17:00	638	637,03	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
6	1978	1978	26/02/1978	07:00	190	69,13	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
7	1979	1979	29/03/1979	07:00	290	156,20	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
8	1980	1980	07/03/1980	17:00	350	220,64	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
9	1982	1982	24/04/1982	07:00	264	131,00	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
10	1983	1983	13/02/1983	07:00	140	36,47	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
11	1984	1984	25/04/1984	07:00	160	48,57	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
12	1987	1987	27/03/1987	17:00	120	25,75	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
13	1988	1988	25/04/1988	07:00	494	408,08	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
14	1989	1989	12/05/1989	07:00	330	198,21	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
15	1991	1991	14/03/1991	07:00	300	166,34	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
16	1992	1992	25/01/1992	07:00	172	56,47	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
17	1993	1993	02/05/1993	07:00	160	48,57	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
18	1994	1994	17/01/1994	07:00	172	56,46	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
19	1995	1995	25/05/1995	17:00	230	100,70	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
20	1997	1997	27/03/1997	07:00	142	37,62	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
21	1998	1998	01/01/1998	07:00	79	12,98	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
22	1999	1999	14/05/1999	07:00	216	89,13	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
23	2000	2000	21/04/2000	07:00	100	16,60	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
24	2001	2001	09/03/2001	07:00	120	23,99	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
25	2002	2002	10/01/2002	07:00	218	86,77	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
26	2003	2003	24/01/2003	07:00	152	39,92	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
27	2004	2004	08/02/2004	07:00	510	429,35	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
28	2005	2005	28/03/2005	07:00	112	21,88	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
29	2006	2006	26/04/2006	07:00	526	455,54	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
30	2008	2008	03/04/2008	17:00	640	640,48	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave

DL – Dupla Leitura (07 e 17 hs)

ANEXO III

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

Máximos por ano hidrológico (01/Jan a 31/Dez)

N	AI	AF	Data	Hora	Cota (cm)	Vazões (m ³ /s)	Observações
31	2009	2009	08/05/2009	07:00	520	446,49	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
32	2010	2010	23/10/2010	07:00	166	52,46	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
33	2011	2011	17/02/2011	07:00	186	62,52	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
34	2014	2014	20/01/2014	07:00	118	22,49	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
35	2015	2015	27/03/2015	07:00	150	36,10	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
36	2017	2017	24/03/2017	07:00	76	10,93	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
37	2018	2018	19/02/2018	17:00	98	9,68	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
38	2019	2019	31/03/2019	07:00	106	12,09	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
39	2020	2020	24/04/2020	07:00	164	43,52	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave
40	2021	2021	16/02/2021	07:00	248	113,16	DL / Vazões geradas a partir da curva-chave

DL – Dupla Leitura (07 e 17 hs)

ANEXO III

Curva-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 de ajustes.

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

Curvas-Chaves	Período	28/04/1969	11/04/1973	28/04/1974
		10/04/1973	27/04/1974	20/07/1999
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	20	40	0
		100	165	108
	a	13,0233	4,74	1,9225
	h_0 (m)	0,15	-0,55	-1,1
	n	1,592	2,958	3,00
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	100	165	108
		450	600	700
	a	29,5574	36,9659	34,2133
	h_0 (m)	0,46	0,46	0,36
	n	1,75	1,6	1,629

Curvas-Chaves	Período	21/07/1999	19/08/2004	24/10/2010
		18/08/2004	23/10/2010	22/04/2014
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	0	0	0
		185	108	151
	a	4,6342	1,9225	4,6599
	h_0 (m)	-0,53	-1,10	-0,51
	n	3	3	3
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	185	108	151
		550	650	200
	a	29,9395	34,2133	35,4157
	h_0 (m)	0,31	0,36	0,46
	n	1,7	1,629	1,689

Curvas-Chaves	Período	23/04/2014	27/03/2015	02/10/2016
		26/03/2015	01/10/2016	26/01/2017
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	0	0	0
		36	200	36
	<i>a</i>	1,94	1,8	1,94
	<i>ho (m)</i>	-0,49	-0,8	-0,49
	<i>n</i>	3,55	3,6	3,55
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	36	200	36
		100	600	100
	<i>a</i>	13,02	34,84	10,0467
	<i>ho (m)</i>	0,15	0,42	0
	<i>n</i>	1,59	1,63	2,174
Ramo 03	Amplitude de cotas (cm)	100		100
		150		500
	<i>a</i>	29,56		29,5574
	<i>ho (m)</i>	0,46		0,46
	<i>n</i>	1,750		1,750

Curvas-Chaves	Período	27/01/2017	15/03/2017	19/05/2017
		14/03/2017	18/05/2017	02/07/2017
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	0	-1	0
		104	109	104
	<i>a</i>	3,2088	2,6988	3,2088
	<i>ho (m)</i>	-0,46	-0,78	-0,46
	<i>n</i>	3,131	3,239	3,131
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	104	109	104
		500	460	460
	<i>a</i>	29,5574	34,2133	29,5574
	<i>ho (m)</i>	0,46	0,36	0,46
	<i>n</i>	1,75	1,629	1,75

Curvas-Chaves	Período	03/07/2017	24/12/2017	28/02/2018
		23/12/2017	27/02/2018	31/05/2018
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	0	0	0
		41	45	103
	<i>a</i>	1,91	2,464	3,098
	<i>ho (m)</i>	-0,49	-0,47	-0,54
	<i>n</i>	3,55	3,056	2,815
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	41	45	103
		100	100	460
	<i>a</i>	2,559	13,02	29,557
	<i>ho (m)</i>	-0,43	0,15	0,46
	<i>n</i>	3,825	1,59	1,75
Ramo 03	Amplitude de cotas (cm)	100	100	
		460	460	
	<i>a</i>	29,5574	29,5574	
	<i>ho (m)</i>	0,46	0,46	
	<i>n</i>	1,750	1,750	

Curvas-Chaves	Período	01/06/2018	20/02/2019	15/09/2019
		19/02/2019	14/09/2019	04/01/2020
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	0	0	0
		45	100	34
	<i>a</i>	1,805	1,567	1,805
	<i>ho (m)</i>	-0,49	-0,71	-0,49
	<i>n</i>	3,55	3,464	3,55
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	45	100	34
		460	460	460
	<i>a</i>	1,66	29,557	3,037
	<i>ho (m)</i>	-0,51	0,46	-0,33
	<i>n</i>	3,3	1,75	3

Curvas-Chaves	Período	05/01/2020	25/03/2020	04/11/2020
		24/03/2020	03/11/2020	15/02/2021
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	0	0	0
		460	210	460
	<i>a</i>	1,462	2,1	1,462
	<i>ho (m)</i>	-0,51	-0,73	-0,51
	<i>n</i>	3,375	3,513	3,375
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)		210	
			600	
	<i>a</i>		34,84	
	<i>ho (m)</i>		0,42	
	<i>n</i>		1,63	

Curvas-Chaves	Período	16/02/2021	07/10/2021
		06/10/2021	31/12/2021
Ramo 01	Amplitude de cotas (cm)	0	0
		200	104
	<i>a</i>	2,069	3,2088
	<i>ho (m)</i>	-0,73	-0,46
	<i>n</i>	3,554	3,131
Ramo 02	Amplitude de cotas (cm)	200	104
		600	500
	<i>a</i>	34,84	29,5574
	<i>ho (m)</i>	0,42	0,46
	<i>n</i>	1,63	1,75

ANEXO III

Estatísticas da série

Estatísticas da Série

Média m³/s	Desvio- Padrão m³/s	Máximo m³/s	Mínimo m³/s	Amplitude m³/s	Assimetria	Mediana m³/s	1º Quartil m³/s	3º Quartil m³/s	AIQ m³/s
149,0	174,6	640,5	9,7	630,8	1,5	59,5	34,7	203,8	169,1

Estatísticas da série transformada: Ln(X)

Média	Desvio- Padrão	Máximo	Mínimo	Amplitude	Assimetria	Mediana	1º Quartil	3º Quartil	AIQ
4,33427	1,20845	6,46222	2,27024	4,19198	0,16085	4,08457	3,54496	5,31615	1,77119

Momentos-L e Razões-L

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
148,9754	87,4628	0,5871	0,4478	0,1589

Momentos-L e Razões-L da série transformada: Ln(X)

l_1	l_2	L-CV	L-SKEW	L-KURT
4,3343	0,7016	0,1619	0,0474	0,0394

Função Acumulada de Probabilidade da Log-Normal para Máximos (μ e σ são parâmetros da distribuição Log-Normal)

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \text{ onde } \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t)dt$$

Inversa da distribuição Log-Normal: $x(F)$ não possui forma analítica

Parâmetros da Distribuição Log-Normal

Fonte: Hosking e Wallis (1997), págs. 193 e 194

$$\text{Momentos - L: } \lambda_1 = \mu \quad \lambda_2 = 0,5642 \quad \sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sigma \quad \text{Parâmetros: } \hat{\mu} = \lambda_1 \text{ e } \hat{\sigma} = \lambda_2\sqrt{\pi}$$

Distribuição	Posição (μ)	Escala (σ)
Log-Normal (μ, σ)	4,3343	1,2435