

**ROBEÍZIA HERBÊNEA MIRANDA DE HOLANDA**

**INFLUÊNCIA DA HIDROLOGIA EM SEGURANÇA DE  
BARRAGEM COMO FERRAMENTA DE DIMENSIONAMENTO  
DE RESERVATÓRIO DE USOS MÚLTIPLOS NO SEMIÁRIDO  
BRASILEIRO – ESTUDO DE CASO NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO RIO APODI.**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em  
Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais - Turma IV  
Programa de Pós-Graduação em Segurança de Barragem; Escola  
Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito  
parcial para obtenção do grau de Especialista

Orientador: Prof. Dr. Cássia Juliana F. Torres

Salvador  
2024

**INFLUÊNCIA DA HIDROLOGIA EM SEGURANÇA DE BARRAGEM COMO  
FERRAMENTA DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO DE USOS  
MÚLTIPLOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO - ESTUDO DE CASO NA  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO APODI.**

**ROBEÍCIA HERBÊNEA MIRANDA DE HOLANDA**  
Eng<sup>a</sup>. Agrônoma

**RESUMO** - Aproximadamente cerca de 87% do semiárido brasileiro está contido na região Nordeste do país, que se faz necessário adoção de um processo estruturado de gerenciamento dos recursos hídricos pode reduzir as vulnerabilidades socioambientais em relação ao suprimento de água e conflitos de interesses nessa região. Portanto, é necessário que a gestão das águas nesta unidade federativa seja feita de forma equilibrada, para garantir sua distribuição. A falta de água afeta a qualidade de vida humana em termos de educação, saúde e capacidade produtiva. A crescente busca pela diminuição das incertezas e tratamento adequado dos riscos, as Agências Fiscalizadoras estão cada vez mais exigentes e não buscam mais apenas atender a critérios normatizados de segurança de barragens estabelecidos pela Política Nacional de Segurança de Barragem (Lei nº12.334/2010 e Lei nº14.066/2020). A implantação de um novo manancial superficial proporcionará adequada garantia ao fornecimento de água e a gestão dos recursos hídricos por meio de alocação negociada de água, pois a região sofre a anos com grandes variações em sua pluviometria contribuindo para os constantes déficits hídricos que se observam nessa região. Esse trabalho detalha a fase de estudos hidrológicos, o qual foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Apodi no município de Coronel João Pessoa no Rio Grande do Norte, sendo o objetivo principal do estudo avaliar o dimensionamento de reservatórios para atendimento aos usos múltiplos em regiões semiáridas associado a segurança dessas estruturas, e tendo como estudo de caso a bacia hidrográfica do Rio Apodi localizada no município de Coronel João Pessoa no Rio Grande do Norte.

**Palavras-chave:** Hidrologia, Bacia Hidrográfica, Vazão Regularizada, Barragem de usos múltiplos.

**ABSTRACT** - Approximately 87% of the Brazilian semi-arid region is contained in the Northeast region of the country, which makes it necessary to adopt a structured water resources management process that can reduce socio-environmental vulnerabilities in relation to water supply and conflicts of interest in this region. Therefore, it is necessary that water management in this federative unit is carried out in a balanced way, to guarantee its distribution. The lack of water affects the quality of human life in terms of education, health and productive capacity. In the growing search for reducing uncertainty and adequate treatment of risks, Supervisory Agencies are increasingly demanding and no longer seek to simply meet standardized dam safety criteria established by the National Dam Safety Policy (Law N°. 12,334/2010 and Law N°. 14,066/2020). The implementation of a new surface spring will provide an adequate guarantee for the supply of water and the management of water resources through negotiated water allocation, as the region has suffered for years with large variations in its rainfall, contributing to the constant water deficits that are observed in this region. This work details the hydrological studies phase, which was carried out in the Apodi River basin in the municipality of Coronel João Pessoa in Rio Grande do Norte. The objective of the present study is to evaluate the sizing of reservoirs to meet multiple uses in regions semi-arid areas associated with the safety of these structures, taking as a case study the Apodi River basin located in the municipality of Coronel João Pessoa in Rio Grande do Norte.

**Keywords:** Hydrology, Hydrographic Basin, Regulated Flow, Multiple-use dam.

## 1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas construídas para conter água em grandes quantidades, permitindo que sejam regulados o fluxo e a sua distribuição. As finalidades podem ser diversas, destacando a garantia do abastecimento de água em épocas de seca, o impedimento de enchentes em períodos de chuvas intensas, a produção de energia elétrica renovável e atividades de mineração. Entretanto, mesmo que a engenharia atual ofereça eficiência na elaboração, construção, manutenção, e operação de barragens, assegurando a conformidade de segurança projetada, é possível afirmar que há sempre alguma possibilidade de se deparar com circunstâncias adversas que possam comprometer o desempenho dessas estruturas (PERINI, 2009).

No relatório final do ICOLD (2019) sobre falhas em barragens, uma análise estatística mostrou que entre as principais causas técnicas de rompimento está a capacidade insuficiente dos vertedouros, diretamente relacionada a capacidade instalada insuficiente, a capacidade disponível insuficiente e a borda livre insuficiente. O estudo apontou um aumento na taxa de falhas de barragem por capacidade inadequada do vertedouro, chegando a quase 50% desde o ano 2000, ou seja, há uma tendência de aumento nas inundações.

Nos primeiros 10 anos de funcionamento de barragens de terra, o relatório da ICOLD (2019) mostrou que existe uma grande quantidade de falhas por galgamento, que causa erosão externa da estrutura. Assim, estimar o risco de inundações e o consequente risco de falha hidrológica da barragem pode ser útil para avaliar riscos e informar decisões relativas à proteção dessas estruturas (CARNEIRO *et al.*, 2022).

Um estudo sobre as principais causas de falhas de barragens realizado por Zhang *et al.* (2007), trouxe que a causa mais comum de falha é o galgamento, isto é, quando a altura da água de uma enchente ou de uma onda ultrapassa a altura do topo da barragem, o que também pode ser entendido como um transbordamento. O parâmetro mais importante para prevenir o galgamento, é, portanto, a borda livre (NIGATU *et al.*, 2017); ou seja, diferença entre a cota do topo da barragem e o nível máximo de cheia do reservatório. Com isso, encontrar a borda livre ideal é um tema de pesquisa fundamental para barragens construídas com diferentes finalidades sob diferentes condições.

Existem diversas incertezas variáveis no projeto de barragens, portanto, é importante que sejam feitas revisões periódicas nas condições de segurança das barragens, considerando possíveis mudanças causadas pelo envelhecimento e deterioração das estruturas (NIGATU *et al.*, 2017). A maioria das barragens foi inicialmente concebida com uma capacidade de suportar inundações projetadas menores do que as necessárias, devido à falta de dados confiáveis sobre inundações e ao uso de métodos de cálculo menos avançados que os atuais (ICOLD, 2019). Como resultado, as projeções de inundações foram subestimadas. Além disso, com o passar do tempo, o valor da vazão de cheia passa a ser superior a vazão de projeto inicial devido ao aumento na quantidade de dados adicionados a série histórica das vazões, o que induz a reavaliação da capacidade de extravasamento dos vertedouros (SOUZA, 2014).

Com a crescente busca pela diminuição das incertezas e tratamento adequado dos riscos, as Agências Fiscalizadoras estão cada vez mais exigentes e não buscam mais apenas atender a critérios normatizados pela Política Nacional de Segurança de Barragem (Lei nº12.334/2010 atualizada pela Lei nº14.066/2020). No Brasil, dependendo da finalidade, as barragens construídas devem atender aos critérios da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), ANM (Agência Nacional de Mineração) ou Ministro de Estado de Minas e Energia. As duas primeiras são autarquias federais

responsáveis pela gestão dos recursos hídricos, e pela exploração e gestão dos recursos minerais brasileiros, respectivamente.

No contexto do semi-árido brasileiro a construção de reservatórios (açudes, barragens, barreiros) representou desde os primórdios da colonização a principal alternativa para transpor as águas precipitadas com extrema variabilidade na região. Durante décadas, o dimensionamento hidrológico de reservatórios foi realizado com base em critério empírico que utilizava o famoso 2VA, ou seja, o critério segundo o qual o volume máximo a ser adotado no projeto de uma barragem é igual a duas vezes o volume médio de água que anualmente chega pelo rio no local onde se pretende construí-la.

O uso de fórmulas empíricas como única ferramenta para análise de reservatórios era uma constância desde o século XIX, quando Rippl propôs o seu famoso diagrama de massas, elaborado a partir da série de vazões disponíveis (RIPPL, 1883). Na época em que foram propostas, as fórmulas empíricas do engenheiro Francisco Gonçalves Aguiar (1978, reprint), representavam uma alternativa prática no dimensionamento de açudes no nordeste brasileiro. O valor histórico dos procedimentos propostos por Francisco Aguiar é indiscutível, mas caiu em desuso a partir da década de 1960.

Nos meios acadêmico e consultivo de engenharia, utiliza-se em larga escala os modelos matemáticos do tipo chuva-vazão (e.g., MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável, Lanna e Schwarzbach, 1988) nos estudos hidrológicos desenvolvidos para bacias do Nordeste. Tais modelos permitem sobrepujar a grande dificuldade existente na rede fluviométrica do Semiárido, em particular nas bacias do chamado Semiárido setentrional (Estados do CE, PB, RN e PE), onde as séries de vazão são curtas e repletas de falhas. Calibrar e validar (quando possível) um modelo chuva-vazão para utilizá-lo na conversão das relativamente extensas séries de precipitação tem sido uma prática difundida desde muitos anos nos cursos de graduação afetos à hidrologia, bem como aplicado por empresas de projeto no dimensionamento hidrológico de reservatórios construídos na região (SARMENTO, 1999).

Da mesma forma, o dimensionamento hidrológico considerando incertezas inerentes ao processo estocástico na formação da vazão ganhou fôlego prático no Nordeste a partir da difusão dos modelos chuva-vazão que proporcionaram o cálculo de séries pseudo-históricas suficientemente longas para utilização estatística (SARMENTO, 2007).

Segundo Guitarrara (2021), as zonas de clima temperado localizam-se, a nível global, entre os trópicos e os polos em ambos os hemisférios do planeta, tendo como características principal a clara distinção entre as quatro estações do ano, temperaturas médias amenas e boa distribuição de chuvas ao longo de todo o ano. Essa situação pode levar a picos de precipitações que, em casos extremos, resultam em inundações e desmoronamentos. Devido a isso, é essencial uma gestão adequada dos recursos hídricos, que pode ajudar a mitigar os impactos negativos. Para isso, o primeiro ponto que deve ser levado em consideração são os dados de séries históricas das precipitações mensais e/ou anuais.

Conhecer a precipitação ao longo do tempo, através das séries históricas, permite que seja inferido sobre padrões sazonais, período de seca e eventos de chuvas intensas, possibilitando que os gestores de recursos hídricos monitorem e planejem o uso da água de maneira mais eficiente.

No Brasil, parte das principais informações meteorológico-climáticas disponíveis encontra-se, sobretudo no Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia

(BDMEP/INMET), que apresentam falhas ou interrupções em suas séries ou conjuntos de dados (OLIVEIRA *et al.* 2021).

Segundo Wanderley *et al.* (2014), o uso de uma série de dados que apresente falha pode levar a conclusões errôneas, exibindo padrões temporais e espaciais diferentes dos que seriam observados sem a existência de lacunas. Além disso, os autores destacam que, nos casos em que o período é grande, há a possibilidade de exclusão dos anos com falhas sem comprometer os resultados, porém, em pequenas séries históricas, essa metodologia não pode ser aplicada, pois impossibilita algumas inferências estatísticas.

A região semiárida brasileira possui cerca de 965.000 km<sup>2</sup>, sendo caracterizada por limitações de recursos naturais favoráveis, decorrentes de fatores geoclimáticos, que impõem fronteiras estreitas ao seu desenvolvimento. Dentre estes recursos, a água é certamente o mais importante, que permanece como desafio à gestão pública, especialmente em áreas de maior escassez. A falta de água afeta a qualidade de vida humana em termos de educação, saúde e capacidade produtiva (BRASIL, 2009; CIRILO; MONTENEGRO; CAMPOS, 2010).

Diante desta realidade, as comunidades mais carentes não podem dispor de infraestrutura com vínculos econômicos, entretanto, as diversas inter-relações entre água, alimentos, energia e o meio ambiente tornam o gerenciamento dos recursos hídricos ainda mais complexo e desafiador. Os cenários de incertezas relacionados às mudanças climáticas tornam as expectativas pertinentes à garantia integrada de qualidade e quantidade de água ainda mais preocupantes (MILLY; DUNNE; VECCHIA, 2005).

Aproximadamente cerca de 87% do semiárido brasileiro está contido na região Nordeste do país, que se faz necessário adoção de um processo estruturado de gerenciamento dos recursos hídricos pode reduzir as vulnerabilidades socioambientais em relação ao suprimento de água e conflitos de interesses nessa região. Portanto, é necessário que a gestão das águas nesta unidade federativa seja feita de forma equilibrada.

Considerando que a Hidrologia é uma ciência alicerçada em dados absolutamente aleatórios. A esperança da realidade é representada em fatos acontecidos que eventualmente se repetirão. Nesta perspectiva a formatação dessa Ciência ser colimada em fatos acontecidos e esperados. No projeto de uma barragem devem compor alguns estudos, tais como: hidrológicos, topográficos, geotécnicos e geológicos da bacia hidrográfica. Em decorrência das análises e dos resultados obtidos desses estudos o barramento é implantado, sendo projetado de acordo com o uso e a demanda hídrica as normas de segurança de barragem a ser atendida.

Diante do exposto, o objetivo do presente estudo consiste em avaliar o dimensionamento de reservatórios para atendimento aos usos múltiplos em regiões semiáridas associado a segurança dessas estruturas, tendo como estudo de caso a bacia hidrográfica do Rio Apodi localizada no município de Coronel João Pessoa no Rio Grande do Norte.

## 2. METODOLOGIA

O projeto de uma barragem requer fundamentalmente a análise e aplicação correta de dois itens relevantes relacionados à segurança da barragem quais sejam: **a) estudos hidrológicos desenvolvidos na bacia hidrográfica em estudo**, onde se determina a vazão máxima de cheia e o volume de armazenamento necessário a regularização da vazão e **b) estudos hidráulicos** utilizados principalmente no dimensionamento do sistema extravasor (eliminação do excesso de água e dissipador de energia), da descarga de fundo (eliminação dos depósitos do fundo e, ou esvaziamento do reservatório), e da tomada de água (estrutura para captação da água represada).

Neste contexto a metodologia deste trabalho foi desenvolvido em quatro etapas: (I) caracterização da área de estudo; (II) caracterização do empreendimento; (III) levantamento dos dados hidrológicos; e (IV) estimativa da cheia máxima de projeto. Salienta-se que esse projeto não considerou descarga de fundo para a barragem.

## 2.1. Caracterização da área de estudo.

O município de Coronel João Pessoa situa-se na mesorregião Oeste Potiguar e na microrregião Serra de São Miguel, limitando-se com os municípios de São Miguel, de Encanto, de Luis Gomes, de Venha Ver, de Riacho de Santana e de Água Nova, abrangendo uma área de 117,1 km<sup>2</sup>, inseridos na folha Pau dos Ferros (SB.24-Z-A-II) na escala 1:100.000, editada pela SUDENE, contava com 4 237 habitantes no último censo (2022). A densidade demográfica é de 36,17 habitantes por km<sup>2</sup> no território do município, que está inserido nos domínios da bacia hidrográfica Apodi-Mossoró.

Banhado apenas por cursos d'água secundários e intermitentes, os principais são a Norte, os córregos: da Olaria, do Marçal e Saco dos Bois, além do Riacho das Almas; a SW, córregos: Carrapateira, Ferreirão e Poço de Vara. Existe apenas um açude relevante para o abastecimento do município: o açude público Caldeirão com capacidade de 484.970m<sup>3</sup>. A rede de drenagem tem padrão do tipo dendrítico (CPRM,2005)

Existe apenas um açude relevante para o abastecimento do município: o açude público Caldeirão com capacidade de 484.970m<sup>3</sup>. A rede de drenagem tem padrão do tipo dendrítico (CPRM,2005). O município possui o índice de consumo médio de água per capita de 88,1 l/habitantes/dia, menor que a média do Estado do RN de 98,32 l/habitantes/dia e bem abaixo da média do país que é de 143,79 l/habitantes/dia. (Instituto Água e Saneamento). O município de Coronel João Pessoa apresenta clima muito quente e semiárido, com estação chuvosa atrasando-se para o outono. O Período Chuvoso está entre fevereiro a junho com temperaturas médias anuais com máxima: 33,0 °C média: 28,1 °C mínima: 21,0 °C Umidade Relativa Média Anual: 66% e com horas de Insolação de 2.700 (CPRM, 2005).



Figura 1. Vista aérea do Município Coronel João Pessoa/RN. (Fonte: <https://coroneljoapessoa.rn.gov.br/historia-cidade>)



A bacia hidrográfica, o qual está inserido o município de Coronel João Pessoa e a bacia hidrográfica Apodi/Mossoró, e seu principal rio é o Rio Apodi. A Bacia ocupa uma superfície de 14.276 km<sup>2</sup>, correspondendo a cerca de 26,8% do território Estadual. Clima Predominância do tipo BSw'h', da classificação climática de Köppen, caracterizado por um clima muito quente e semi-árido, com a estação chuvosa se atrasando para o outono. No extremo sudoeste da bacia, correspondendo às suas nascentes, ocorre o tipo Aw', caracterizado por um clima tropical chuvoso com verão seco e estação chuvosa se adiantando para o outono (Plano Estadual de Recursos Hídricos/RN. Dados da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SEMARH) contabilizam 51 reservatórios principais (incluindo açudes, barragens e lagoas), responsáveis pelo abastecimento das populações.

De acordo com o Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte (IGARN), nela estão presentes 618 açudes, atingindo um volume de 469.714.600 m<sup>3</sup>, correspondendo 27,4% e 10,7% dos totais de açudes e volumes acumulados do Rio Grande do Norte. Na maior parte da bacia, as chuvas anuais são em torno de 700 mm, onde os meses compreendidos entre janeiro e julho são considerados períodos de grande pluviosidade (estação chuvosa) e os meses compreendidos entre agosto e dezembro são de baixa pluviosidade (OLIVEIRA JÚNIOR, 2009).

## 2.2. Caracterização do empreendimento

A barragem em estudo encontra-se no momento em fase de projeto tem sua construção prevista em uma seção do Rio São Gonçalo, na localidade Poço de Varas, distando cerca de 4,0 km da sede municipal de Coronel João Pessoa, no Estado do Rio Grande do Norte. O acesso ao local da futura barragem, partindo da cidade de Natal, Capital do Estado do Rio Grande do Norte, é feito pela rodovia BR-304 até a cidade de Mossoró, de onde, toma-se a BR-405 em direção a Pau dos Ferros, distante 160 km desta.

A bacia hidrográfica controlada pelo barramento proposto sobre o Riacho São Gonçalo abrange parcialmente os municípios de Coronel João Pessoa, São Miguel e Venha-Ver, apresentando uma área de 94,95 km<sup>2</sup>. A Figura 2 apresenta a localização da Barragem Poço D'água.

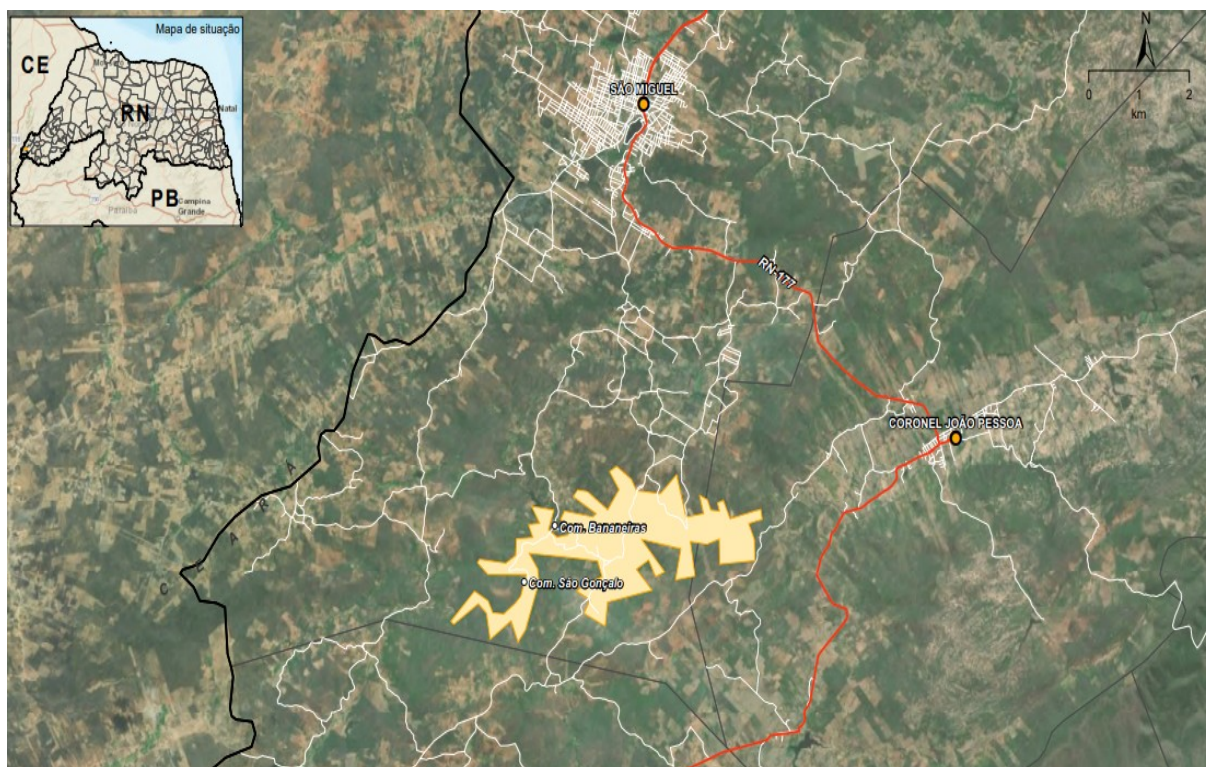


Figura 2: Mapa de localização da Barragem Poço D'água.

Fonte: Acquatool Consultoria com base no Projeto e outras informações disponíveis



### 2.2.1 Descrição geral do projeto

O empreendimento estudado trata-se de uma barragem em concreto compactado a rolo (CCR), com taludes de declividade 0,8 (H):1,0 (V), cota de coroamento 437 m, a 32 m da cota mínima do leito medida em seu boqueirão (405 m) e a 38 m da cota de fundação prevista para a barragem (399 m). A Barragem localizada entre as estacas E1+10 m a E7+1,00 m incluindo o sangradouro central, foi projetada do tipo gravidade em concreto compactado a rolo (CCR), com altura máxima de 29 m (trecho submersível e de 18 m (trecho insubmersível) a partir do terreno natural. Conforme a Figura 3, o maciço em CCR, trecho insubmersível, possui uma extensão 41 m (exceto sangradouro), com coroamento na cota 437 m e soleira na cota 433 m, a cota máxima de sangria é a 435,65, com lâmina máxima de sangria igual a 2,65 m e a folga da barragem projetada é de 1,35 m e a largura do coroamento de 7 m. O talude de montante da barragem foi adotado em vertical e o de jusante segue a diretriz com declividade 0,80(H): 1,0(V), sendo escalonado em degraus de 0,60 m de espelho, correspondendo a duas camadas de 0,30 m, com patamares de 0,48 m.

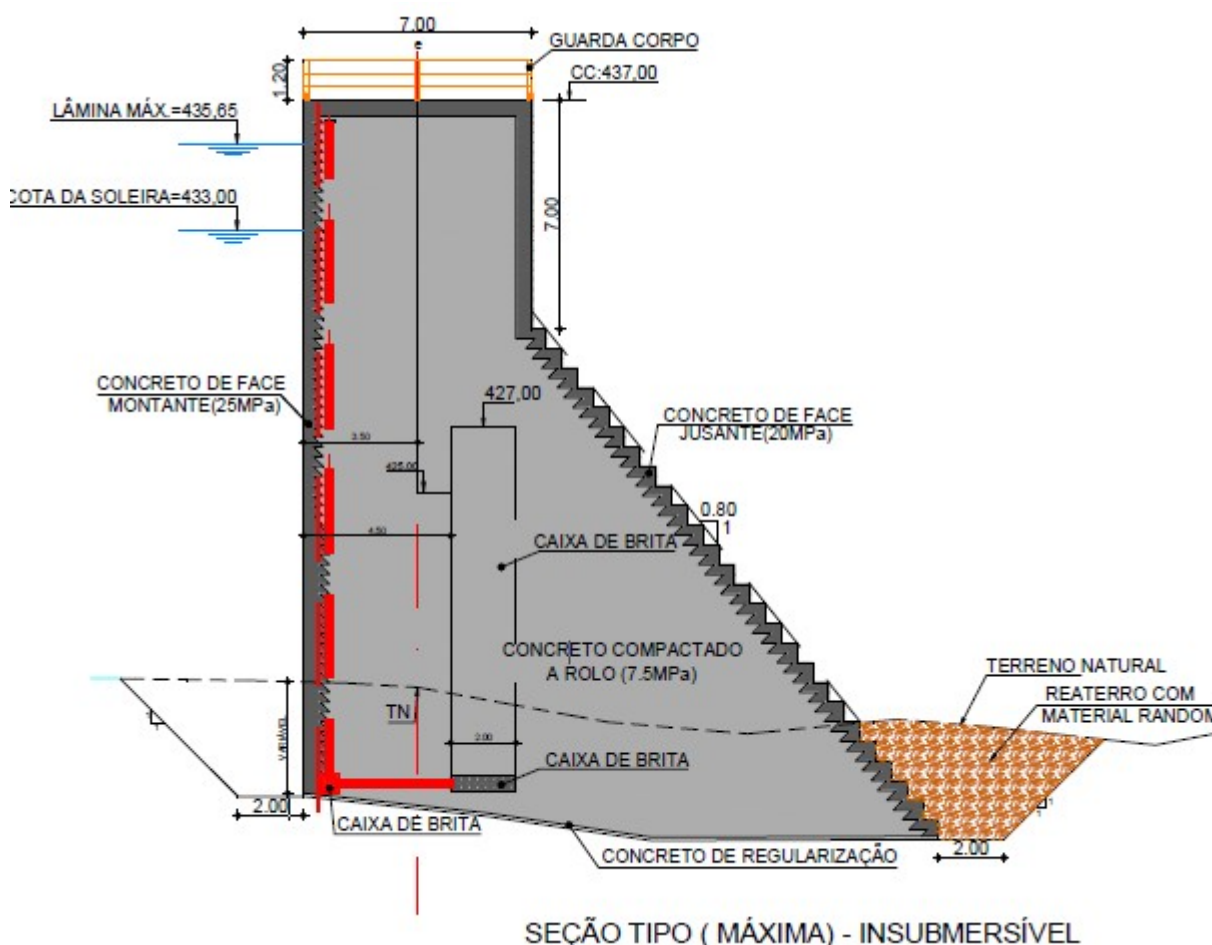


Figura 3. Seção tipo em CCR (trecho insubmersível).

Para o alívio de possíveis subpressões e inspeção do maciço, o sistema de drenagem interna foi constituído por uma galeria com um sistema de furos a partir de seu piso, objetivando inspecionar o maciço. A galeria de drenagem percorrerá longitudinalmente a barragem desde a estaca E3+7 m até a estaca E6, com a cota do piso da galeria projetada na cota 409 m e com acessos através de escada na cota 412 m. Nos trechos das ombreiras, entre as cotas 412 m até a cota 427 m, a drenagem será feita através de uma caixa de brita contínua, direcionando as águas colhidas para a calha da galeria. Na ombreira esquerda, a caixa de brita inicia na estaca E6+13 m e se estende até a galeria, à estaca E6. A galeria contará com dois acessos, nas estacas E3 e E6+7m, para inspeção do maciço e encaminhamento das águas drenadas ao leito do rio. O dimensionamento da barragem, galeria,

ACESSO À GALERIA DE DRENAGEM

412,00

GALERIA DE DRENAGEM- DETALHE DO ACESSO

#### 2.2.1.1. Vertedouro

Figura 5. Seção tipo em CCR (trecho submersível).

### 2.2.1.2. Tomada d'água

O dimensionamento da tomada d'água teve como parâmetro principal a vazão a ser regularizada 0,291 m<sup>3</sup>/s, calculada nos estudos hidrológicos. A tomada d'água do Açude Poço de Varas está situada na ombreira direita, estaca 2 + 15m a montante e estaca 3 + 4m do lado de jusante da barragem, e é composta por uma tubulação de 600 mm de diâmetro perpendicular ao eixo do maciço, na cota 416 m com comprimento de 41 m.

A tubulação possui, na entrada, uma grade de proteção, seguida mais para jusante de uma comporta acionada por meio de dispositivo hidromecânico a partir da casa de comando no coroamento da barragem. O controle das vazões será feito através de uma válvula dispersora do tipo Howell-Bunger com diâmetro de 500 mm, localizada na extremidade de jusante, a fim de permitir uma descarga dissipada a jusante da barragem. Uma casa de comando abrigará o dispositivo de acionamento da válvula. A localização da tomada d'água foi determinada em função das características locais de topografia e geotecnia. Sua implantação se dará assente sobre uma base de concreto de regularização.

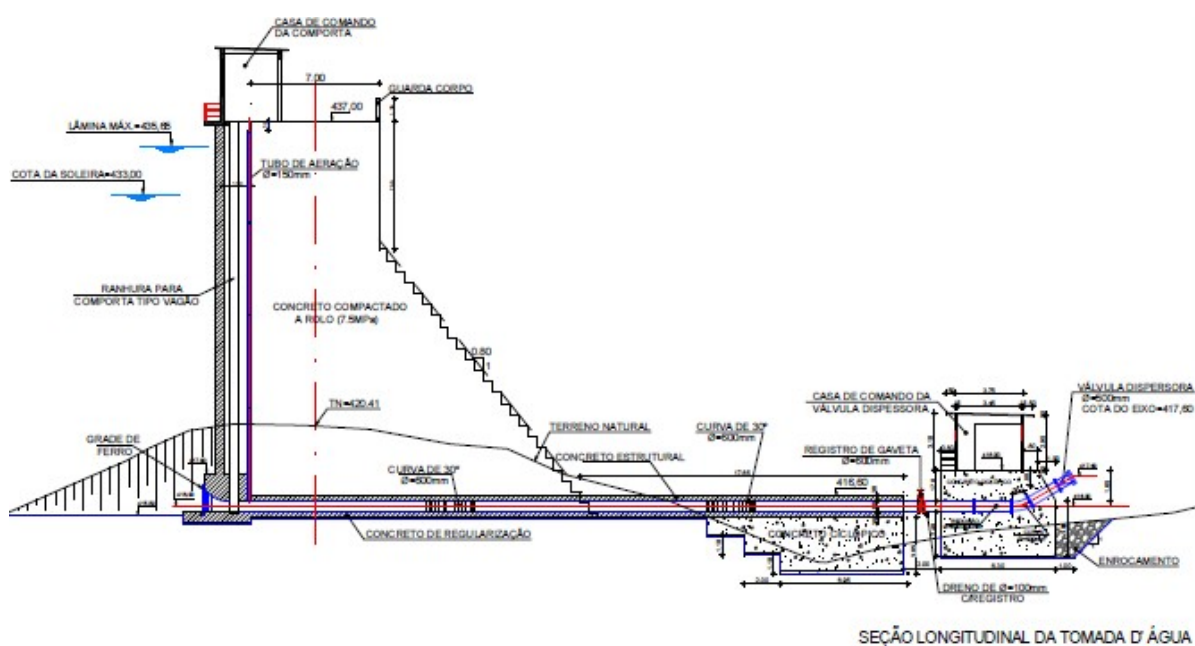


Figura 6. Seção longitudinal da tomada d'água.

## 2.3. Levantamento dos dados hidrológicos

O levantamento dos dados hidrológicos deste trabalho foi desenvolvido em III etapas: (I) Identificação da bacia hidráulica capaz de armazenar o volume de regularização estimado para barragem em estudo, (II) Estimativa da vazão máxima de cheia e de volumes de regularização do reservatório, e (III) Dimensionamento do sistema extravasor do reservatório.

### 2.3.1 Identificação da bacia hidráulica capaz de armazenar o volume de regularização estimado para barragem em estudo.

O Riacho Encanto, corpo hídrico que será barrado, está localizado na bacia do Rio Apodi, sendo a sub-bacia do Riacho Encanto afluente da margem esquerda do Rio Apodi, e possui suas nascentes entre os Estados do Ceará e da Paraíba, desaguando no Oceano Atlântico no Estado do Rio Grande do Norte. As nascentes estão situadas acima de 710m de altitude e até o local da barragem percorre cerca de 20 km com um desnível de 255m, obtendo uma declividade média de 0,01275m/m.

A seguir será apresentada a caracterização física completa da área de contribuição da Barragem em estudo, constando de delimitação da área, principais afluentes, tipo de uso do solo, tipo de solo, entre outros aspectos importantes para a realização dos estudos hidrológicos na bacia.

A bacia hidrográfica afluente ao reservatório em estudo foi discretizada em 25 sub-bacias em consonância aos afluentes localizados a montante, topografia e particularidades locais. A discretização foi realizada visando um melhor entendimento do regime hidrológico a montante da barragem em estudo, foi obtida em ambiente SIG com auxílio do software HEC-HMS em sua versão 4.8, e QGIS em sua versão 3.18. As principais características das bacias hidrográficas consideradas neste estudo – área, comprimento do rio principal (L), declividade média do rio e da bacia, fator de forma, coeficiente de compacidade e densidade de drenagem, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 Características físicas das sub-bacias discretizadas Sub-bacia.

Sub-bacia	Comprimento Rio Principal (km)	Declividade Rio Principal (m/m)	Declividade Média da Bacia (m/m)	Fator de Forma (Kf)	Coeficiente Compacidade (Kc)	Densidade drenagem (Km/km²)
SB12	4.53	0.04	0.12	0.05	0.47	0.39
SB11	4.29	0.05	0.16	0.06	0.48	0.40
SB13	5.65	0.04	0.12	0.04	0.49	0.54
SB14	0.84	0.05	0.06	0.05	0.63	1.69
SB19	6.05	0.04	0.14	0.04	0.50	0.42
SB7	3.59	0.02	0.09	0.03	0.58	0.22
SB5	5.48	0.06	0.20	0.06	0.59	0.30
SB20	2.93	0.04	0.12	0.05	0.59	0.90
SB10	4.53	0.04	0.11	0.05	0.58	0.24
SB9	5.08	0.03	0.11	0.03	0.45	0.42
SB8	4.12	0.04	0.13	0.05	0.58	0.30
SB16	1.40	0.05	0.11	0.05	0.62	1.41
SB21	4.66	0.05	0.14	0.05	0.61	0.48
SB18	5.19	0.03	0.12	0.03	0.47	0.72
SB3	4.45	0.05	0.13	0.05	0.51	0.36
SB2	3.16	0.07	0.15	0.07	0.60	0.19
SB1	4.24	0.06	0.12	0.06	0.48	0.22
SB15	1.72	0.08	0.19	0.10	0.62	1.24
SB22	3.24	0.06	0.15	0.06	0.57	0.67
SB17	2.94	0.03	0.17	0.06	0.53	1.34
SB4	3.71	0.04	0.12	0.04	0.56	0.10
SB23	1.18	0.03	0.09	0.04	0.64	2.22
SB6	7.46	0.03	0.12	0.03	0.41	0.60
SB24	3.30	0.03	0.10	0.03	0.40	0.66
SB25	3.80	0.03	0.13	0.03	0.66	0.66

A declividade média dos rios principais das sub-bacias variou entre 3 e 7%, e as áreas discretizadas entre 0.22km² e 8,14km², com declividade média variando entre 9 e 20%, característica de regiões acidentadas. Além da discretização espacial e coleta dos dados espaciais das bacias hidrográficas, é de vital importância a discretização dos rios e riachos presentes no sistema hidrográfico, que devido à complexidade do sistema afluente a barragem em estudo, haverá diversas chegadas de hidrogramas que não obrigatoriamente possuem picos coincidentes.

Assim os trechos de rios foram discretizados em 12 trechos, sendo 8 trechos referentes ao riacho encanto, e os demais 4 trechos afluentes. As principais características dos trechos de rios discretizados, comprimento, declividade e sinuosidade, está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Características físicas dos trechos de rio discretizados.

Nome	Comprimento (km)	Declividade (m/m)	Sinuosidade
R1	3.21	0.00	1.16
R10	0.87	0.01	1.16
R11	1.11	0.05	1.57
R12	0.40	0.01	1.06
R2	0.91	0.00	1.22
R3	1.00	0.00	1.11
R4	1.80	0.00	1.47
R5	3.08	0.00	1.18
R6	2.15	0.02	1.11
R7	3.02	0.01	1.27
R8	3.43	0.02	1.22
R9	2.55	0.01	1.30

Nota-se que a hidrografia a montante da barragem em estudo é de baixa sinuosidade indicando tempos de concentrações mais baixos e coincidência de picos de vazão. A caracterização regional dos solos da bacia hidrográfica, foi realizada afim de se entender como se dá o escoamento superficial ao longo de toda a área de contribuição, cabe destacar que foi realizada individualmente para todas as bacias discretizadas apontadas anteriormente, utilizando a base no Mapa de Recursos Naturais do Brasil (MRN) que é constituído por arquivos gráficos e tabulares, em formato digital e georreferenciados, com informações ambientais de Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Vegetação.

Para tanto foram utilizados os Mapas Temáticos pedológicos, em formato vetorial e escala compatível com 1:250.000, adaptados a uma base cartográfica de referência, composta pelas massas d'água continentais e os limites territoriais do país. As especificações metodológicas do mapeamento temático podem ser encontradas nas publicações Manuais Técnicos em Geociências do IBGE.

Posteriormente os tipos pedológicos da região foram enquadrados de acordo com o tipo hidrológico do Solo, com em metodologia proposta por SARTORI, 2005.

Ao longo da bacia hidrográfica do açude do Poço de Varas foram encontrados dois tipos pedológicos de solos enquadrados em um tipo hidrológico ao longo das sub-bacias discretizadas.

De maneira geral nota-se homogeneidade litológica na área de contribuição da barragem, com solos classificados hidrológicamente do tipo C, ou seja, solos com baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração.

### 2.3.2. Estimativa da vazão máxima de cheia e de volumes de regularização do reservatório.

#### 2.3.2.1 Regionalização de vazões - (SMAP)

##### 2.3.2.1.1 Posto fluviométrico selecionado (36125000)

Selecionou-se a estação 36125000 para o estudo de regionalização, tendo como principais fatores, amplitude e consistência dos dados, área de contribuição, e hidrogeologia da região, a ser discutida em seguida. A série das vazões médias mensais utilizada para o estudo de regionalização foi a compreendida entre 1973 e 2020. De maneira similar ao realizado nas séries evaporimétricas e pluviométricas.

Os modelos de simulação hidrológica chuva-vazão podem ser aplicados para a obtenção de séries sintéticas de vazões a partir de dados históricos de precipitação e evaporação, o modelo nada



mais é que uma representação matemática simplificada dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica.

Modelos desse tipo são necessários quando não se há dados medidos na região de interesse, como é o caso da bacia hidrográfica da Barragem em estudo. Para tanto, se faz necessária a regionalização de parâmetros de uma bacia hidrográfica com dados medidos para a bacia em estudo.

Conforme apresentado anteriormente a região estudada possui homogeneidade nos parâmetros fluviométricos analisados, e a bacia de contribuição do posto 36125000 possui similaridades litológicas e hidrogeológicas com a bacia hidrográfica da Barragem em estudo.

Assim, o próximo passo para a obtenção das vazões afluentes à Barragem Poço de Varas é definir os parâmetros de escoamento do modelo chuva-vazão a ser utilizado, tomando como referência a bacia do posto 36125000, e em seguida assumir os mesmos parâmetros de escoamento para a bacia da Barragem.

Para o estudo em questão adotou-se o método SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) a nível mensal, desenvolvido por Lopes et al (1981). Adotou-se tal método devido à robustez e simplicidade do modelo, onde são necessários apenas quatro parâmetros para calibração dele, somado a isso o SMAP é um modelo com extensa bibliografia e amplamente utilizado para estudos semelhantes no ambiente acadêmico e de consultoria.

Após a calibração e validação dos parâmetros do modelo chuva-vazão, se dá prosseguimento à etapa de regionalização, que consiste na adoção da hipótese que a bacia com dados medidos possui mesmas características de escoamento da bacia onde se deseja aferir as vazões.

Assim, utilizando os parâmetros da regionalização e com a utilização dos dados de entrada de chuva, evaporação e área de drenagem do reservatório da Barragem em estudo, foi possível a geração da série sintética de vazões médias mensais afluentes ao reservatório da Barragem, para o período compreendido entre 1912 e 2020. A escolha de um período de estudo longo baseia-se em tentar reduzir as incertezas da variabilidade climática típica do semiárido.

#### **2.3.2.1.2 Regionalização de vazões - (SMAP)**

Após a calibração e validação dos parâmetros do modelo chuva-vazão, se dá prosseguimento à etapa de regionalização, que consiste na adoção da hipótese que a bacia com dados medidos possui mesmas características de escoamento da bacia onde se deseja aferir as vazões.

Assim, utilizando os parâmetros encontrados, e com a utilização dos dados de entrada de chuva, evaporação e área de drenagem do reservatório da Barragem em estudo, foi possível a geração da série sintética de vazões médias mensais afluentes ao reservatório da Barragem, para o período compreendido entre 1912 e 2020.

A escolha de um período de estudo longo baseia-se em tentar reduzir as incertezas da variabilidade climática típica do semiárido. Nota-se ainda que as vazões sintéticas geradas para a bacia da Barragem apresentam valores similares as 6 estações fluviométricas estudadas para as demais variáveis estudadas, com vazão específica de 2,76 l/s/km<sup>2</sup>, lâmina anual escoada média de 87,03 mm, coeficiente de variação de 1,27 e coeficiente de escoamento de 9,2%. Indicando que a regionalização de vazões realizada para o reservatório da Barragem em estudo apresentou valores similares às demais bacias da região, e aferindo confiabilidade aos dados modelados.

#### **2.3.2.1.3 Cálculo das chuvas intensas**

Como alternativa ao método clássico dos pluviogramas, tem-se o Método das Isozonas (Torricco, 1975). Este método utiliza dados de chuvas diárias e, através de um processo de desagregação, transforma para cada período de retorno, a chuva de 1 dia de duração, em chuvas de duração variando de 6 minutos a 24 horas.

O método tem por base o uso de "Isozonas", determinadas por Torricco, nas quais as relações entre as alturas de chuva de 1 hora e 24 horas e 6 minutos e 24 horas são constantes para um dado período de retorno. A metodologia empregada obedece a sequência descrita a seguir:

- i. Selecionar o posto pluviométrico;
- ii. Selecionar, para cada ano, o valor da precipitação máxima diária e formar a série de máximos anuais;
- iii. Ajustar a série de máximos anuais a uma ou mais distribuições de probabilidade e executar, para cada uma delas, o teste do Chi-quadrado para verificar a qualidade do ajustamento;
- iv. Selecionar uma distribuição de probabilidades e estimar, para os períodos de retorno desejados, a chuva intensa de um dia de duração;
- v. Transformar a chuva de um dia em chuva de 24 horas de duração através da relação

$$P_{24h} = 1,1 P_{1dia}$$

- vi. Localizar a isozona do posto estudado e extrair da tabela os valores das relações entre a chuva de 24 horas e as chuvas de 1 hora e de 6 minutos, para os períodos de retorno em estudo;
- vii. Calcular a chuva de 6 minutos hora de duração, através da multiplicação pelo fator R'

$$P_{6min} = R' \cdot P_{24h}$$

- viii. Calcular a chuva de 1 hora de duração, através da multiplicação pelo fator R

$$P_{1h} = R \cdot P_{24h}$$

- ix. Conversão da chuva pontual em chuva espacial para toda a região pela equação:

$$P_A = P_o (1 - W \cdot \log(A/A_o))$$

onde:

W = parâmetro regional;  $P_A$  = Precipitação sobre toda a área;  $P_o$  = Chuva pontual; A = Área em estudo; e  $A_o$  = 25 km<sup>2</sup> (área base para chuva pontual).

- x. Colocar em gráficos em papel probabilístico próprio, os valores  $P_{24h}$  e  $P_{1h}$  e  $P_{24h}$  e  $P_{6min}$  e ligá-los através de uma reta para obtenção de chuvas de durações intermediárias

#### 2.3.2.1.4 Cheia de projeto

As cheias de projeto com períodos de retorno de 100, 1.000 e 10.000 anos são utilizadas na análise do comportamento hidráulico do sangradouro do Reservatório da Barragem em estudo, no sentido de *verificação da segurança* da barragem supracitada. O programa utilizado é o Flood Hydrograph Package (HEC-HMS), desenvolvido pelo Hydrologic Engineer Center, do U.S. Army Corps of Engineers (EUA).

O modelo hidrológico HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center é capaz de simular os processos de transformação chuva-deflúvio em redes de bacias hidrográficas, podendo incorporar elementos tais como sub-bacias, trechos de rios, junções, reservatórios, desvios, fontes de vazão e sumidouros. Nos padrões definidos pelo U.S. Army Corps of Engineers - e disponíveis no programa - são três os diferentes métodos para a determinação das cheias sintéticas: 1) a cheia de projeto padrão (standard project storm); 2) a cheia máxima provável e, 3) a cheia de projeto de diferentes durações derivadas de dados área-altura de chuva.

Para o desenvolvimento da cheia de projeto, dois parâmetros devem ser inicialmente estimados: a *duração* da chuva e o *intervalo de tempo* para cada incremento de chuva. A duração da chuva deve ser, *no mínimo*, igual ao tempo de concentração da bacia, mas, *preferencialmente*, mais longa.

Uma duração *mais longa* reflete melhor as condições reais onde, normalmente, uma chuva crítica acontece *inserida* em uma chuva de maior duração.

No presente estudo, adotou-se uma chuva com duração de 24 horas, ou seja, muito superior aos tempos de concentração das sub-bacias discretizadas.

Por sua vez, o *intervalo de cálculo* deve ser suficientemente curto para definir com precisão o hidrograma de cheia. Estima-se que um intervalo de tempo que produz quatro ou cinco pontos no ramo ascendente do hidrograma é suficientemente preciso (Hoggan, 1996). Dentro destas premissas adotou-se neste estudo um intervalo de tempo (it) igual a 5 minutos.

### 2.3.3 Dimensionamento do sistema extravasor (sangradouro) do reservatório.

O estudo do projeto da barragem adotou um evento com recorrência de 1.000 anos para o dimensionamento do sistema extravasor, tendo adotado um vertedouro de 70 metros na El. 433,00, e capaz de descarregar uma vazão de 658 m<sup>3</sup>/s, com uma lâmina máxima de 2,65m, para a determinação das chuvas de projeto foram utilizados os dados de 1 posto pluviométrico com dados de 1919-1991.

O vertedouro tem uma largura de 70 metros com estreitamento em 45 metros até a bacia de dissipação. O reservatório possui uma lâmina máxima de água de 2,65 metros, no qual a cota da lâmina máxima está a 435,65m e a cota do coroamento a 437,00 m.

Para a determinação do volume afluyente médio da barragem em estudo, foi utilizado uma aproximação de área, utilizando dados secundários da barragem Arapuã, sendo estimado um volume afluyente de 12,75 hm<sup>3</sup>, com precipitação média de 801 mm representando um coeficiente de escoamento de escoamento médio de 17% na região, enquanto (Studart, 2005) indica que a eficiência de reservatórios no semiárido do nordeste, brasileiro varia entre 5% e 10%, na região do vale do Jaguaribe, localizado nas proximidades do eixo a ser barrado o coeficiente de escoamento é em média 8%.

Foi considerando um coeficiente de variação das vazões médias (CV) de 0,40, conforme (Campos, 1997) o coeficiente de variação médio em regiões semiáridas do nordeste brasileiro varia entre 0,8 a 1,4, coerente com rios de alta variabilidade interanual, característica de rios intermitentes.

A capacidade de acumulação da barragem foi estimada em 25,8 hm<sup>3</sup>, com 29 metros de altura, o dimensionamento hidrológico para regularização de vazões foi feito com uso da metodologia do diagrama triangular, e estimou a vazão regularizada, com 90% de garantia em 290 L/s. O resumo do estudo hidrológico realizado no projeto da barragem encontra-se detalhado na Tabela 5.

**Tabela 1:** Resumo do estudo hidrológico realizado no projeto da barragem

RESUMO DO ESTUDO HIDROLÓGICO	
Volume Afluyente	12.750.000,00 m <sup>3</sup>
Descarga Máxima Milenar Afluyente:	Qa = 761,00 m <sup>3</sup> /s
Cota da soleira:	433,00m
Capacidade de Acumulação (Cota 433):	25.843.000,00m <sup>3</sup>
Largura do Sangradouro: ..	70,00 m
Descarga Máxima Milenar Efluyente:	Q1.000 = 658,00 m <sup>3</sup> /s
Lâmina Máxima Adotada:	2,65 m
Percentual de Regularização:	72%
Percentual de Sangria	18%
Percentual de Evaporação:	10%
Vazão Regularizada (Q90): .	0,289m <sup>3</sup> /s

**Tabela 6:** Características Gerais da barragem no projeto.

CARACTERÍSTICAS GERAIS	
Localização:	Coronel João Pessoa – RN Coordenadas UTM 557.963 E e 9.303.773 N (Zona 24S) - DATUM WGS84
Bacia Hidrográfica:	Apodi
Rio Barrado:	Riacho São Gonçalo
Área da bacia hidráulica:	253,52 ha
Área da bacia hidrográfica	94,95 km <sup>2</sup>
Coeficiente de Escoamento	15,60%
Deflúvio Médio Anual	100 mm
Vazão regularizada (Q90%):	224 l/s
Precipitação média anual na Bacia Hidrográfica do Reservatório:	901,30 mm
Volume de acumulação na cota 433:	25.843.000 m <sup>3</sup>
Volume mínimo operacional:	102.222 m <sup>3</sup>
MACIÇO	
Tipo:	concreto compactado a rolo (CCR)
Cota do coroamento:	437 m
Altura máxima (inclusive fundação):	38 m
Largura do coroamento:	7,00 m
Extensão do coroamento:	110,0 m
VERTEDOURO	
Tipo:	Perfil Creager
Cota da soleira:	433,0 m
Extensão:	70 m
Vazão afluyente (TR = 1000 anos):	673,15 m <sup>3</sup> /s
Vazão efluente (TR = 1000 anos):	434,73 m <sup>3</sup> /s
Atenuação do pico de cheia milenar:	53%
Lâmina de sangria:	1,73 m para TR = 1.000 anos
Vazão afluyente (TR = 10.000 anos):	806,30 m <sup>3</sup> /s
Vazão efluente (TR = 10.000 anos):	637,3 m <sup>3</sup> /s
Atenuação do pico de cheia decamilenar:	40%
Lâmina de sangria:	2,02 m para TR = 10.000 anos

Fonte: Acquatoool Consultoria com base no Projeto e outras informações disponíveis.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

O dimensionamento hidrológico da Barragem em estudo foi determinado com base no método de Campos, 1987. O referido método apresenta um modelo gráfico aplicado a reservatórios de águas superficiais situadas em regiões semiáridas e sujeitas a altas taxas de evaporação. Tem como suporte teórico a Teoria Estocástica dos Reservatórios ou Teoria do Armazenamento de Moran. Segundo o autor, esse método apresenta como novidade na teoria a introdução de uma matriz de evaporação por levar em conta as perdas devido a esse fenômeno. Os dados de comportamentos da regularização, de sangria e de evaporação apresentam resultados obtidos para diferentes cotas de armazenamento. O ponto ótimo para definição da capacidade do reservatório está na cota 433, conforme estão representados na Tabela 7 e Figura 4.

Tabela 7 - Resultados dos parâmetros para a capacidade de acumulação do reservatório

Cota (m)	Altura (m)	Volume de Acumulação (m³)	fk	$\alpha$	fe	Regul- riza	Sangra	Evapo- ração	Vazão regu- larizada (m³/ano)	Vazão re- gulariza- da (m³/s)
438	34	40899387,42	5.292	1040.591	0.5087	18%	9%	73%	1461044,87	0,04633
437	33	37475532,39	4.849	1042.812	0.5090	17,50%	11%	71,50%	1420460,29	0,04504
436	32	34266887,05	4.434	1045.742	0.5095	17%	13%	70%	1379875,71	0,04376
435	31	31269631,64	4.046	1049.634	0.5101	15,5%	16,5%	68%	1258121,97	0,03989
434	30	28466806,88	3.683	1054.326	0.5109	16%	18%	66%	1298706,55	0,04118
<b>433</b>	<b>29</b>	<b>25842811,16</b>	<b>3.344</b>	<b>1059.609</b>	<b>0.5117</b>	<b>20%</b>	<b>20%</b>	<b>60%</b>	<b>1545466,10</b>	<b>0,05148</b>
432	28	23389227,15	3.026	1065.471	0.5127	17%	22%	61%	1379875,71	0,04376
431	27	21094554,00	2.729	1071.714	0.5137	16%	28%	56%	1298706,55	0,04118
430	26	18952448,91	2.452	1078.314	0.5147	15,5%	31,50%	53%	1258121,97	0,03989
429	25	16946275,07	2.193	1084.562	0.5157	15%	35%	50%	1217537,39	0,03861
428	24	15062078,95	1.949	1089.56	0.5165	14%	38%	48%	1136368,23	0,03603
427	23	13300728,42	1.721	1093.181	0.5171	13,50%	42%	44,50%	1095783,65	0,03475
426	22	11661288,98	1.509	1095.162	0.5174	13%	46%	41%	1055199,07	0,03346
425	21	10144501,40	1.312	1095.4	0.5174	12%	51,50%	36,50%	974029,91	0,03089
424	20	8744254,53	1.131	1093.032	0.5171	11%	55%	34%	892860,75	0,02831
423	19	7457076,94	0.965	1087.196	0.5161	9%	61%	30%	730522,44	0,02316

Comportamentos da regularização, sangria e evaporação

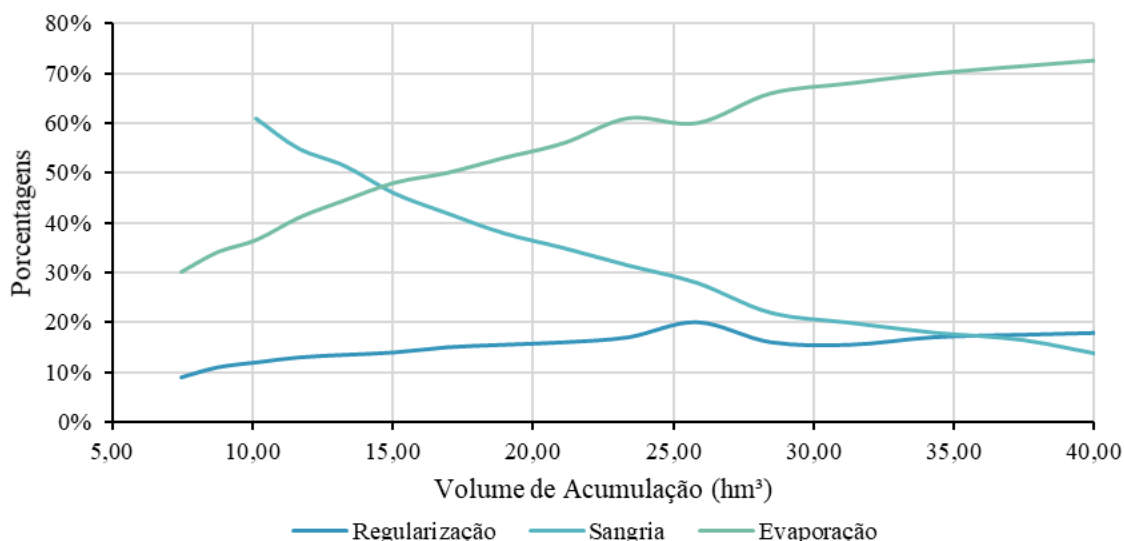


Figura 4. Gráfico dos comportamentos da regularização, sangria e evaporação.



Observa-se que o ponto onde ocorreu a redução do percentual de regularização, considerado como ponto ótimo, encontra-se na cota 433, porém o ponto no qual a evaporação torna-se superior ao volume sangrado encontra-se na cota 428. A partir daí reflete-se sobre os ganhos e perdas no reservatório e a sua jusante. Na cota 428 tem-se um volume de 15 hm<sup>3</sup> que é levemente inferior a duas vezes o volume afluente médio (8,17 hm<sup>3</sup> x 2 = 16,23 hm<sup>3</sup>). Nesta cota tem-se o ganho de 12% em evaporação e os rios a jusante receberiam 18% a mais de água ao longo do ano. Já a regularização reduziria apenas 6%, o equivalente a 0,00858 m<sup>3</sup>/s ou 463.639,83 m<sup>3</sup>/ano.

Na cota 433 tem-se o volume aproximado de 25,84 hm<sup>3</sup> que é inferior ao volume máximo da série afluente de vazões (30,5 hm<sup>3</sup>), cerca de 3 vezes o volume afluente médio da barragem. Neste caso a barragem verteria pouco, reduzindo as vazões à jusante. Entretanto, observando a região, encontra-se a jusante o reservatório Encanto que possui uma bacia de contribuição de 485 km<sup>2</sup> e uma capacidade de 5,2 hm<sup>3</sup>, que é considerada uma capacidade pequena em vista dos outros reservatórios do semiárido, e possui uma grande área de contribuição, devendo possuir vertimentos recorrentes. Assim, o reservatório da Barragem em estudo representa apenas 18% da área do Reservatório Encanto o que não prejudicaria sua vazão afluente.

Além disso, por tratar-se de uma região no semiárido, onde o déficit hídrico está bastante presente, a Barragem em estudo pretende a diminuir a vulnerabilidade da região acumulando mais água, principalmente tendo em vista a baixa capacidade de acumulação do Reservatório Encanto a jusante.

Como objetivo fazer uma análise das cidades que poderão ser atendidas com a vazão do reservatório da Barragem em estudo. Considerou-se a cota 433 onde situa-se a tomada d'água, na qual, observando-se a Tabela 7, tem-se uma vazão regularizada é 1.545.466,10 m<sup>3</sup>/ano. A partir disto, considerou-se o consumo da população urbana até 5.000 habitantes como 120 L/hab/dia e verificou-se que o reservatório poderá atender à 35.284 habitantes. Observando a localização da Barragem, verificou-se que existem três municípios próximos, são eles: São Miguel, Venha-ver e Coronel João Pessoa, que juntos possuem uma população urbana de 21.749 habitantes, conforme Tabela 8.

Tabela 8. Número de habitantes das cidades próximas ao reservatório da Barragem em estudo.

<b>Municípios</b>	<b>Habitantes</b>
São Miguel	17.691,04
Venha ver	2.199,77
Coronel João Pessoa	1.858,37
<b>Total</b>	<b>21.749,18</b>

Constata-se que é possível abastecer as três cidades com folga. Esse fato é relevante principalmente para os municípios de Venha-Ver e Coronel João Pessoa que são abastecidos por reservatórios não monitorados e segundo a CPRM (2005) com capacidades inferiores a 100.000 m<sup>3</sup> e 484.970 m<sup>3</sup> respectivamente.

### **3.1. PRECIPITAÇÕES MÉDIAS E MÁXIMAS NA BACIA DA BARRAGEM**

Visando uma melhor aderência ao modelo de chuvas médias e máximas, foram utilizados os dados de precipitação média sobre as bacias hidrográficas utilizadas, em detrimento a adoção de apenas um posto pluviométrico representativo.

Para tanto, foram utilizados os dados de precipitação diária dos 17 postos pluviométricos selecionados, tal metodologia exclui a necessidade do preenchimento das falhas diárias, visto que no caso de algum posto possuir falha em dado dia, a chuva média será recalculada apenas utilizando os postos com dados consistidos.

Para o cálculo da chuva máxima foi utilizado o método de Thiessen, Polígonos de Voronoi. Esse método subdivide a área da bacia em áreas delimitadas por retas unindo os pontos das estações, dando origem a vários triângulos. Traçando perpendiculares aos lados de cada triângulo, obtêm-se vários polígonos que representam os postos pluviométricos. Admite-se que cada posto seja

representativo daquela área onde a altura precipitada é tida como constante. Cada estação recebe um peso pela área que representa em relação à área total da bacia. Se os polígonos abrangem áreas externas à bacia, essas porções são eliminadas no cálculo.

Assim, para cada dia no horizonte de estudo (1911-2020) foi gerado uma configuração de polígonos, e identificados os postos com influência sobre as bacias hidrográficas que se pretende determinar as chuvas médias e máximas. A precipitação média anual na bacia hidrográfica da barragem foi calculada em 780,04mm, com máximo anual de 1.557,07 mm, e mínima de 174,04mm, conforme mostra a Figura 5.

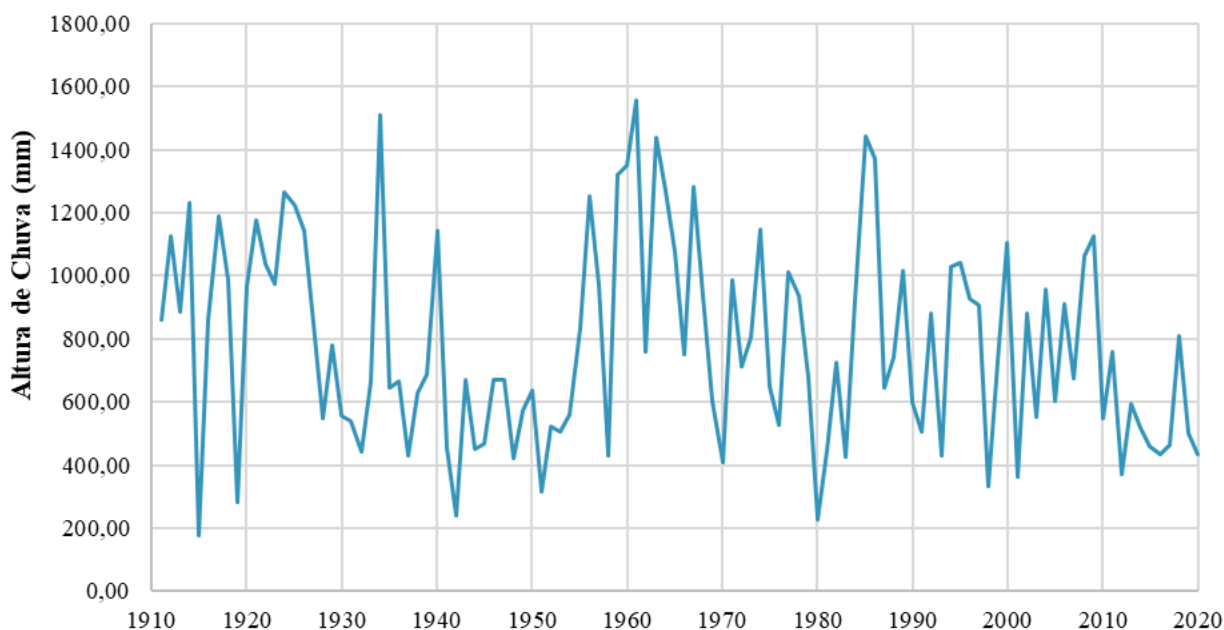


Figura 5. Série de precipitações totais anuais da Bacia Hidrográfica da barragem.

O período da quadra invernos tem máximos entre fevereiro e maio, com máximos mensais no mês de março, e início das precipitações em dezembro, indicando influência das frentes frias, típicas das porções mais ao centro-sul do nordeste brasileiro, conforme apresentado na Figura 6.

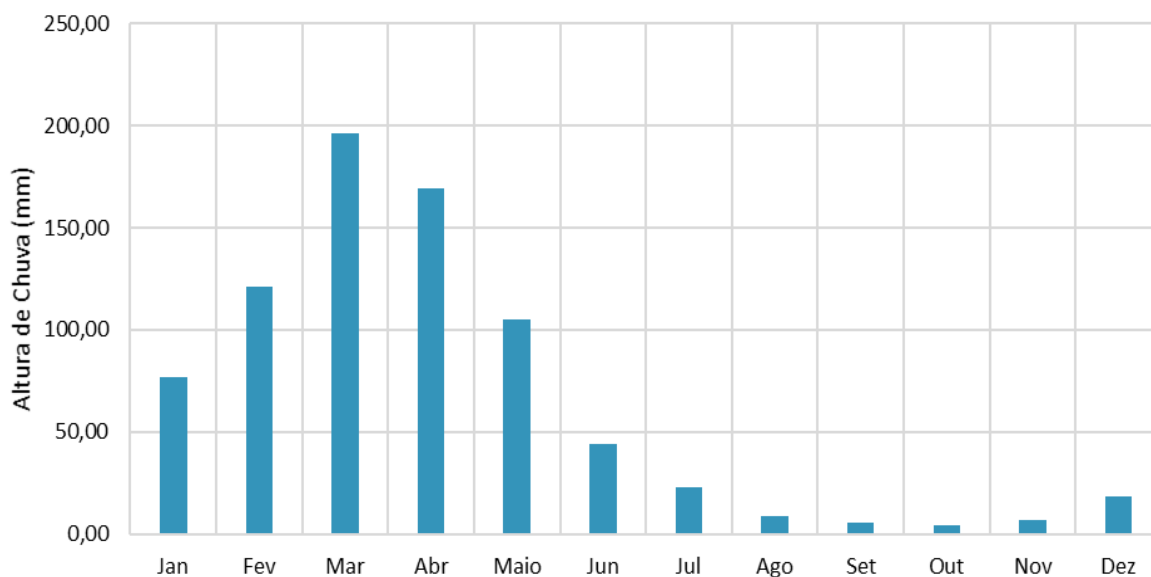


Figura 6. Série de precipitação média mensal da Bacia Hidrográfica da barragem.

Com relação aos máximos anuais na bacia da barragem, variou entre 27,00 mm e 200 mm, a série de máximos anuais na bacia hidrográfica é apresentado na Figura 7.

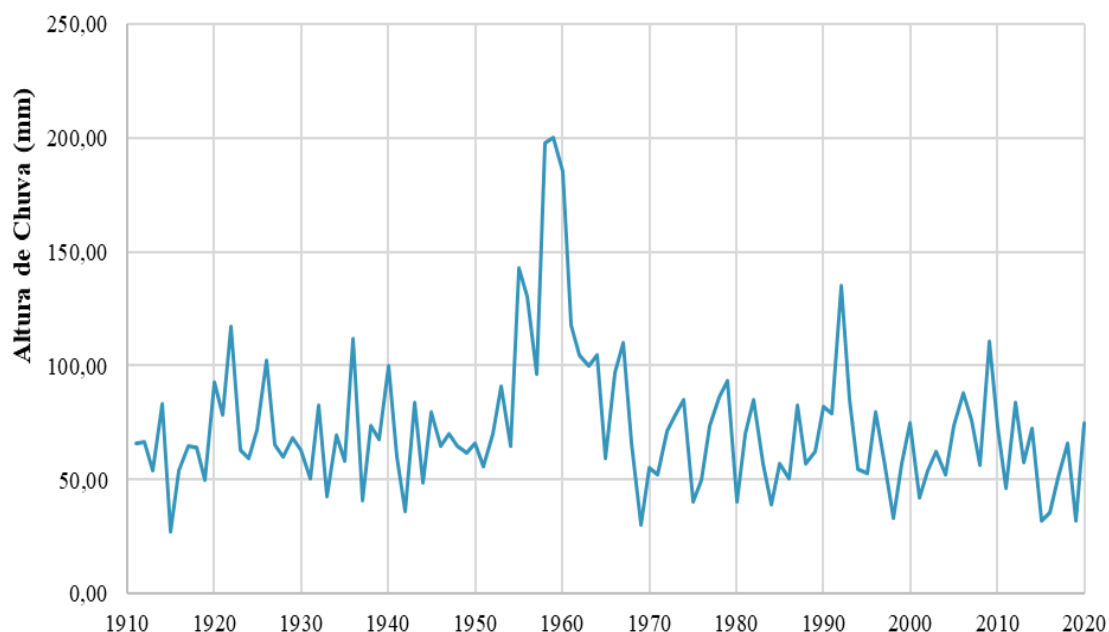


Figura 7. Série de precipitação máxima anuais da Bacia Hidrográfica da barragem.

### 3.2 - SELEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES E ESTIMATIVAS DOS VALORES DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS

Foram selecionados 17 postos pluviométricos com influência sobre a bacia hidrográfica da região de estudo com boa consistência e disponibilidade de dados. A série de precipitação utilizada foi de Jan/1911 até Dez/2021, totalizando 111 anos de dados, as principais características e localização dos postos foram apresentados anteriormente, os dados foram obtidos por meio da Plataforma HidroWeb administrada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico-ANA, complementados com dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN.

Após a seleção dos postos foi aplicado o método dos Polígonos Thiessen com dados de chuva diários para determinar as precipitações médias diárias na área de estudo. A elaboração dos hietogramas para cada uma das sub-bacias consideradas na simulação exige que previamente seja aplicado às chuvas, um coeficiente de atenuação espacial das precipitações máximas calculadas anteriormente, para cada pluviômetro contemplado associado a cada configuração de polígono Thiessen, uma vez que os dados pluviométricos são representativos para bacias de até 25 km<sup>2</sup> e, superada esta área, a precipitação associada a um posto pluviométrico deve ser corrigida conforme indicado por (USACE, 2010).

Para o coeficiente de atenuação das chuvas foi utilizado o estudo de curvas FRA publicado no TP-29 parte 1 do USWB (1957), as curvas utilizadas para a atenuação da chuva estão apresentadas na Figura 8. Como se trabalhou com a chuva relacionada ao método de Thiessen, a correção deve ser aplicada a cada posto incluído na ponderação de cada configuração do Thiessen, sempre que este represente uma área que supera os 25 km<sup>2</sup>.

Assim, os intervalos de tempo em que o método de Thiessen incluiu uma grande quantidade de postos pluviométricos, as correções espaciais se manifestam menores que nos intervalos em que o método de Thiessen incluiu poucos postos. Quando maior for o número de postos considerados no Thiessen, melhor será a correção devido à variabilidade espacial da chuva.

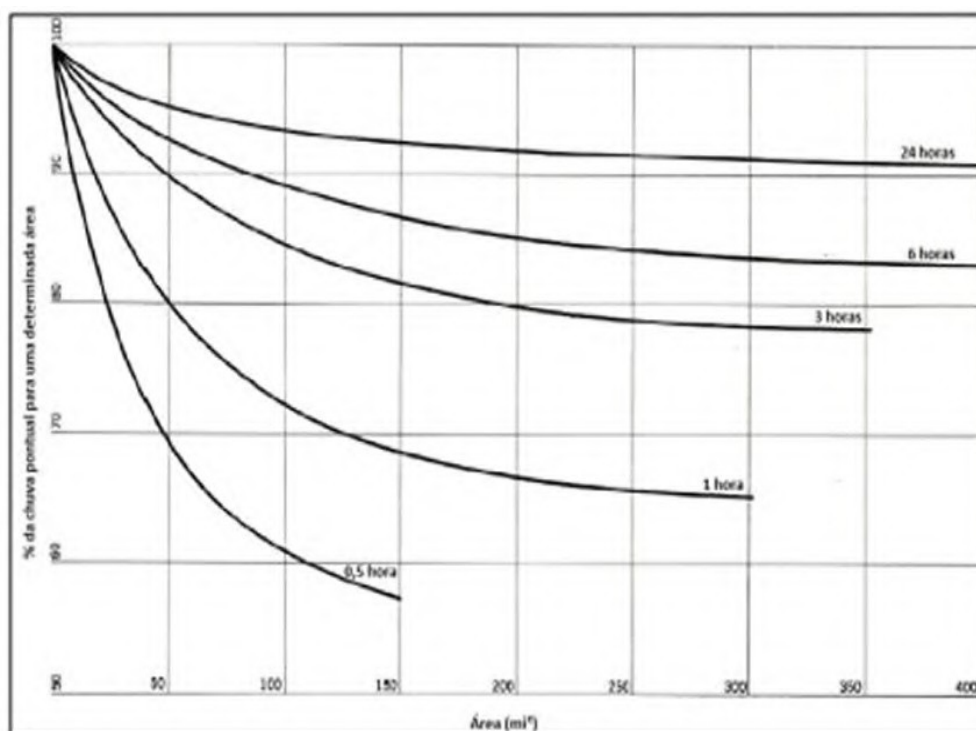


Figura 8. Curvas FRA do USWB (1957).

Ajustou-se uma distribuição de probabilidade aos eventos chuvosos máximos anuais com duração igual a um dia. Estes valores foram usados para posterior discretização temporal das intensidades de chuvas pelo método de Taborga Torrico.

Para escolha da precipitação com períodos de retorno adotados, foram testadas distribuições estatísticas de extremos como Normal truncada, Lognormal de 2 parâmetros, Lognormal de 3 parâmetros, Extremo tipo I (Gumbell), Weibull, Gamma e Exponencial. A Tabela 9 apresenta a estatística de Anderson-Darling para as distribuições testadas, enquanto a Figura 9 apresenta o gráfico da estatística A De-specífica para a distribuição Lognormal, para um intervalo de confiança de 95%, selecionada para prosseguimento no estudo de extremos

Tabela 9. Estatística de Anderson Darling Distribution

Distribution	AD	P	LRT P
Normal	3.634	<0.005	
Box-Cox Transformation	0.623	0.102	
<b>Lognormal</b>	<b>0.623</b>	<b>0.102</b>	
3-Parameter Lognormal	0.613	*	0.484
Exponential	21.545	<0.003	
2-Parameter Exponential	9.113	<0.010	0
Weibull	3.417	<0.010	
3-Parameter Weibull	1.501	<0.005	0
Smallest Extreme Value	10.935	<0.010	
Largest Extreme Value	0.516	0.202	

Gamma	1.109	0.007	
3-Parameter Gamma	0.868	*	0.025
Logistic	1.449	<0.005	
Loglogistic	0.234	>0.250	
3-Parameter Loglogistic	0.243	*	0.482
Johnson Transformation	0.16	0.948	

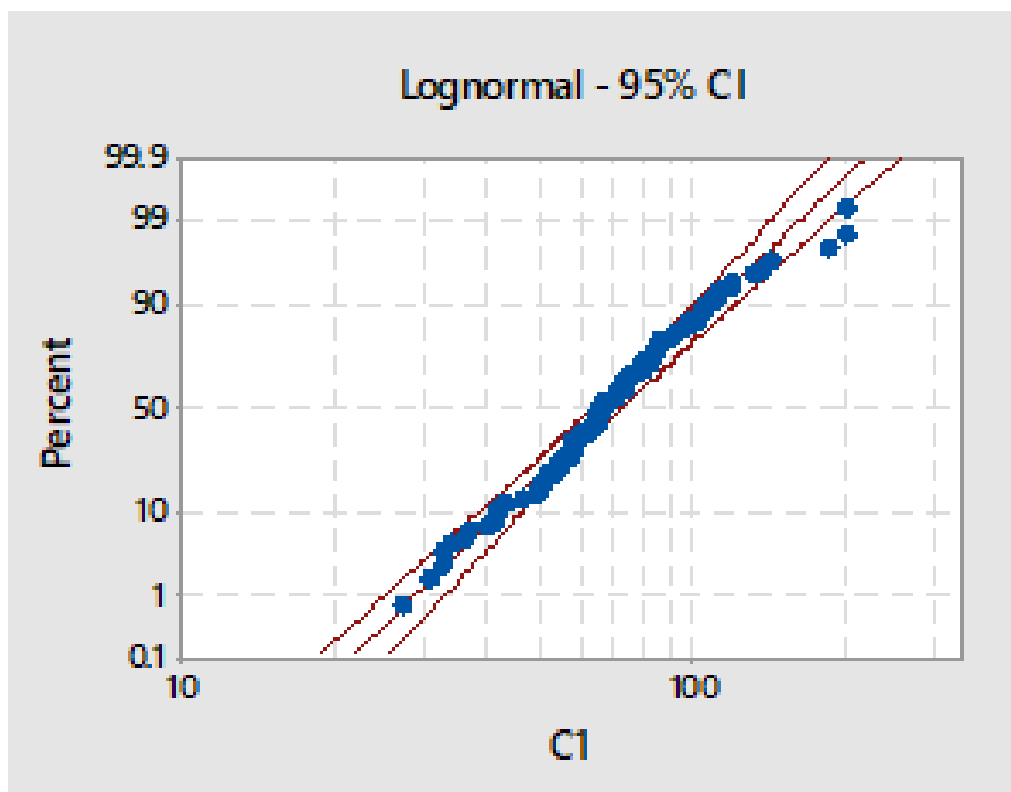


Figura 9. Teste de Aderência para Distribuição LogNormal (IC=95%).

Assim, utilizando os coeficientes recomendados e através de interpolação, foram obtidos os valores de precipitação, para os intervalos de 6, minutos, 1 h, 24 h, para os períodos de retorno definidos no estudo, conforme ilustra a Tabela 10 e a Figura 10, cabe destacar que as precipitações apresentadas já estão corrigidas em função da área associada a cada posto pluviométrico.

Tabela 10. Chuvas com duração de 6min, 1h e 24h para os períodos de retorno de 100, 1000 e 10000 anos.

Ajuste Pela Lognormal			
TR	6min	1h	24h
TR-100 Anos	24.50	82.07	178.81
TR-1.000 Anos	32.58	105.84	237.84
TR-10.000 Anos	41.21	129.64	300.80



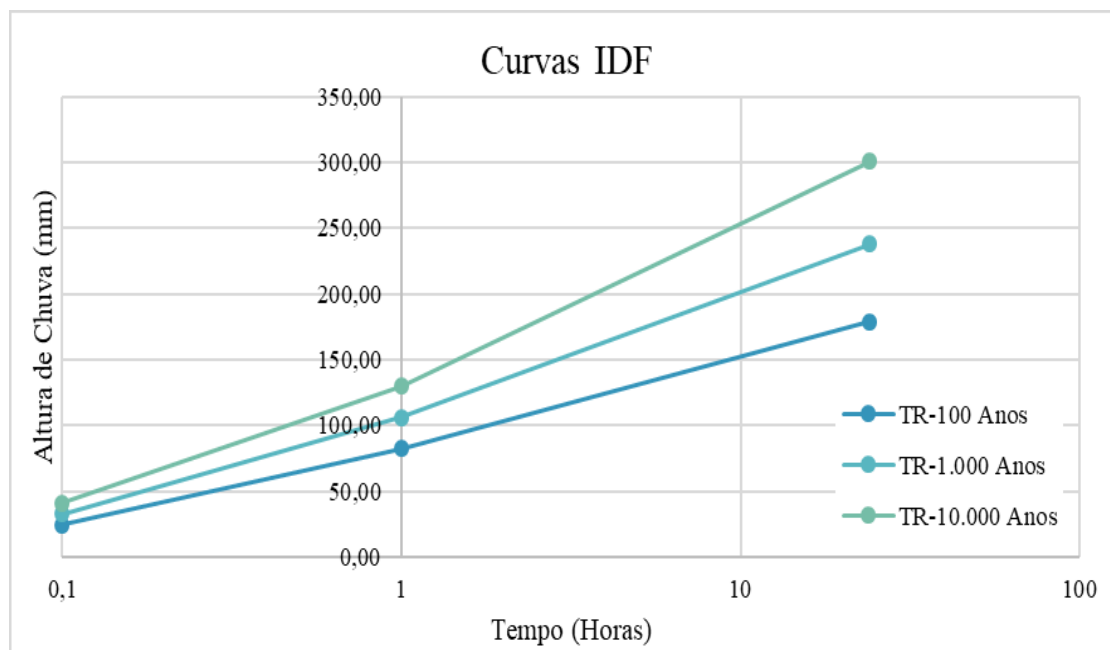


Figura 10. Curvas IDF para os períodos de retorno de 100, 1000 e 10000 anos.

### 3.3 A CHEIA DE PROJETO

As cheias de projeto com períodos de retorno de 100, 1.000 e 10.000 anos foram utilizadas na análise do comportamento hidráulico do sangradouro do Reservatório da Barragem, no sentido de *verificação da segurança* da barragem supracitada. O programa utilizado é o Flood Hydrograph Package (HEC-HMS), desenvolvido pelo Hydrologic Engineer Center, do U.S. Army Corps of Engineers (EUA).

O modelo hidrológico HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center é capaz de simular os processos de transformação chuva-deflúvio em redes de bacias hidrográficas, podendo incorporar elementos tais como sub-bacias, trechos de rios, junções, reservatórios, desvios, fontes de vazão e sumidouros. O modelo elaborado contendo os elementos citados acima é apresentado na Figura 11.

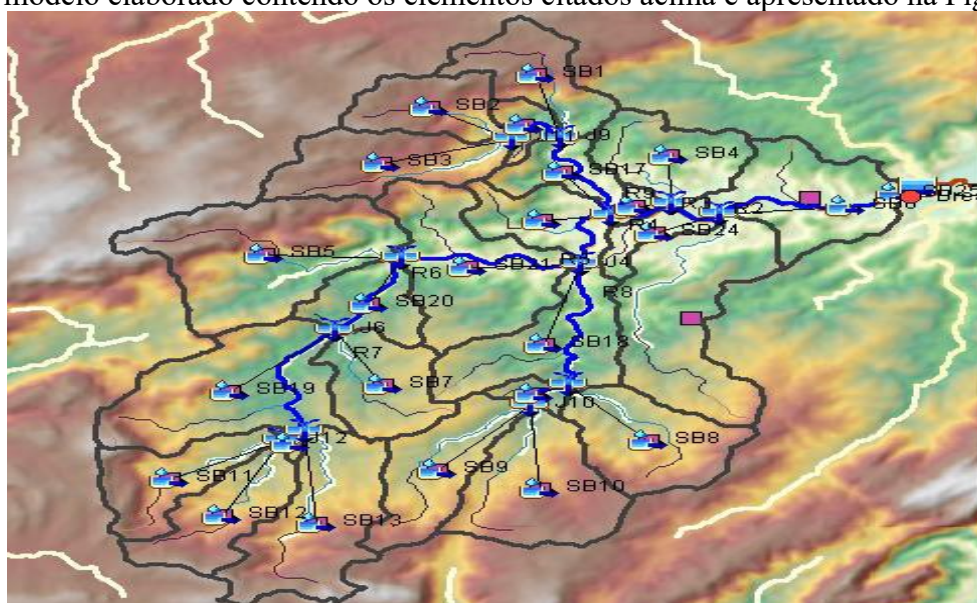


Figura 11. Configuração da modelagem hidrológica desenvolvido no software HEC-HMS.

Nos padrões definidos pelo U.S. Army Corps of Engineers - e disponíveis no programa - são três os diferentes métodos para a determinação das cheias sintéticas: 1) a cheia de projeto padrão

(standard project storm); 2) a cheia máxima provável e, 3) a cheia de projeto de diferentes durações derivadas de dados área-altura de chuva.

Para o desenvolvimento da cheia de projeto, dois parâmetros devem ser inicialmente estimados: a *duração* da chuva e o *intervalo de tempo* para cada incremento de chuva. A duração da chuva deve ser, *no mínimo*, igual ao tempo de concentração da bacia mas, *preferencialmente*, mais longa. Uma duração *mais longa* reflete melhor as condições reais onde, normalmente, uma chuva crítica acontece *inserida* em uma chuva de maior duração.

Adotou-se uma chuva com duração de 24 horas, ou seja, muito superior aos tempos de concentração das sub-bacias discretizadas. Por sua vez, o *intervalo de cálculo* deve ser suficientemente curto para definir com precisão o hidrograma de cheia. Estima-se que um intervalo de tempo que produz quatro ou cinco pontos no ramo ascendente do hidrograma é suficientemente preciso (Hoggan, 1996). Dentro destas premissas adotou-se neste estudo um intervalo de tempo (Dt) igual a 5 minutos.

A Figura 11 apresenta as chuvas de 24 horas, em blocos com intervalos de 5 minutos, para os tempos de retorno de 100, 1.000 e 10.000 anos, duração de 24 horas e intervalo de tempo de 5 minutos, para a discretização da chuva foi utilizado o método dos blocos alternados.

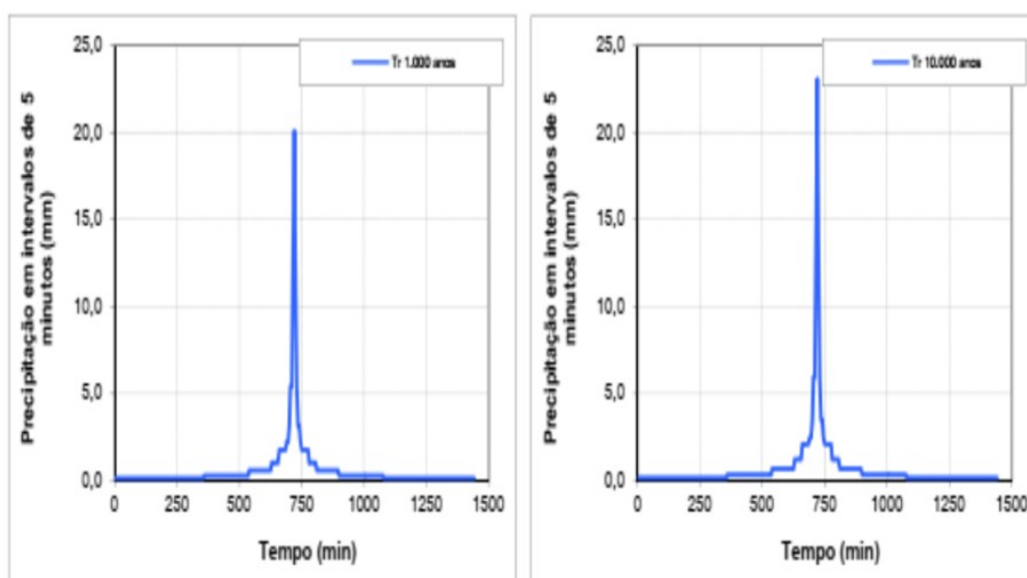


Figura 11. Hietograma de Projeto (períodos de retorno de 1.000 e 10.000 anos, duração de 24 horas e intervalo de tempo de 5 minutos).

### 3.4 - DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOURO

Segundo o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (ANA, 2016) o tempo de recorrência para barragens com altura entre 15m e 30m é de 1.000 anos, conforme Tabela 11.

Tabela 11. Tempo de Recorrência

Altura, h (m)	Volume, V (hm <sup>3</sup> )	Tempo de recorrência (anos)
$h \geq 30$	$V \geq 50$	CMP
$15 \leq h < 30$	$03 \leq V < 50$	1000
$h < 15$	$V < 03$	500

Desta forma, foram realizados cenários com as possíveis larguras do vertedouro, conforme Tabela 11 e Figura 12.

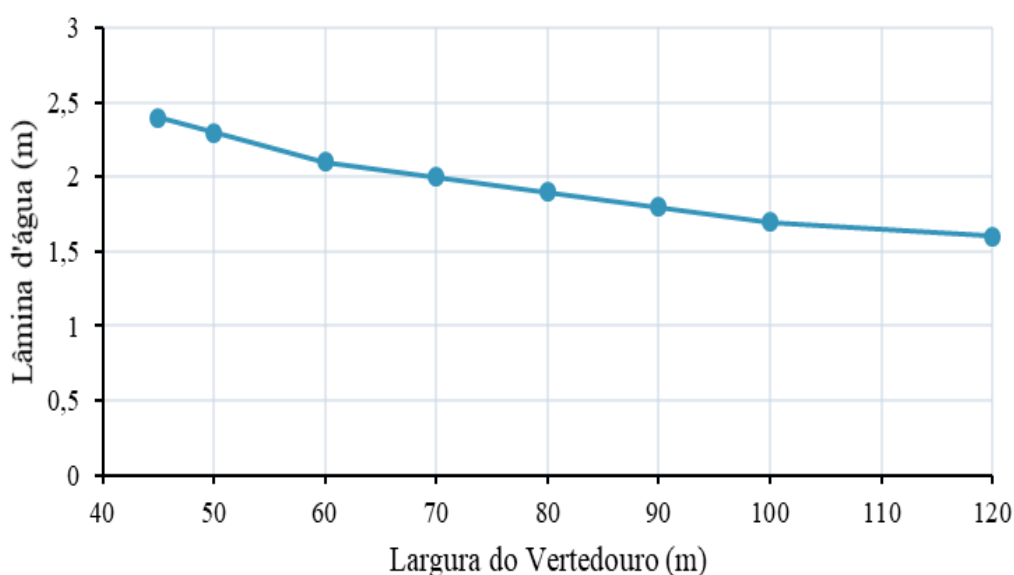


Figura 12. Largura do vertedouro x Lâmina D'água

Verificou-se que em todos os cenários as larguras seriam adequadas, sem grandes diferenças entre elas. Assim, devido ao melhor funcionamento hidráulico de um vertedouro sem transição horizontal, além das questões topográficas do local da Barragem, verificou-se que não haveria danos com a mudança da largura para 45 m, em relação à anterior de 70m. Portanto, optou-se por uma largura constante de 45 m do emboque a bacia de dissipação.

Tabela 12. Cenários das possíveis larguras de vertedouro para Tr 1000 anos

Cenário	Largura do Vertedouro (m)	Cota	Área de contribuição (km <sup>2</sup> )	Qafl (m <sup>3</sup> /s)	Qefl (m <sup>3</sup> /s)	Qafl/A (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Amort. (%)	NA (m)	Lâmina (m)	Cota do Coroamento (m)
Cenário 01	45	433	94.27	691,5	344.1	7.34	50.24%	435.4	2.4	435.9
Cenário 02	50				362.2		47.62%	435.3	2.3	435.8
Cenário 03	60				396.1		42.72%	435.1	2.1	435.6
Cenário 04	70				423.6		38.74%	435.0	2	435.5
Cenário 05	80				445.5		35.57%	434.9	1.9	435.4
Cenário 06	90				466.4		32.55%	434.8	1.8	435.3
Cenário 07	100				483.9		30.02%	434.7	1.7	435.2
Cenário 08	120				511.3		26.06%	434.6	1.6	435.1

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Hidrologia é uma ciência alicerçada em dados absolutamente aleatórios. A esperança da realidade é representada em fatos acontecidos que eventualmente se repetirão. Daí a formação dessa Ciência ser colimada em fatos acontecidos e esperados.

A localização do empreendimento em região adjacente às áreas urbanas caracteriza-se como uma boa opção para construção da barragem, conforme mostrou os estudos hidrológicos. A vazão regularizada do reservatório será de 581.386 m<sup>3</sup>/mês, 6.976.632 m<sup>3</sup>/ano, considerando o consumo da população urbana de 5.000 habitantes como 120 L/hab/dia, desta forma, verificou-se que o reservatório poderá atender à 159.283 habitantes.

O processo de gestão de Alocação de Água será garantido com a construção do novo reservatório de água. Constata-se que é possível abastecer as três cidades com folga. Esse fato é relevante principalmente para os municípios de Venha-Ver e Coronel João Pessoa que são abastecidos por reservatórios não monitorados e segundo a CPRM (2005) com capacidades inferiores a 100.000 m<sup>3</sup> e 484.970 m<sup>3</sup>, respectivamente.

O Período de Enchimento do Reservatório apresenta características de escoamento diferenciadas, tanto das condições naturais prévias à implantação da barragem como da situação normal de operação durante a vida útil do reservatório, isso é primordial para segurança de barragem.

No caso do Riacho São Gonçalo estes problemas são relativizados pelo fato de se tratar de um curso d'água intermitente com escoamento não nulo ao longo de no máximo seis meses, o tempo médio de enchimento pode ser calculado com base na relação entre a capacidade de armazenamento do reservatório e o volume médio anual escoado na seção de rio barrado. Este tempo é estimado em dos dois anos com margem de erro não superior aos 10%.

O Projeto da Barragem não prevê a implantação de comportas para a operação do reservatório da Barragem. Desta forma, a operação do mesmo se resume ao controle das retiradas de vazões para que estas sejam compatíveis com a vazão regularizada calculada para uma garantia de 90% (Q90%), sendo os excedentes não reservados vertidos de forma não controlada.

Com a análise da Hidrologia do projeto, acrescida de novos dados do período, chegou-se à conclusão teórica de que o sangradouro pode ser reduzido de 70,00 m para 45,00 m. A barragem projetada possui um volume acumulável de 25.843.000,00m<sup>3</sup>. A precipitação média anual na bacia hidrográfica da barragem foi calculada em 780,04mm, com máximo anual de 1.557,07 mm, e mínima de 174,04mm. O impacto da implantação da Barragem nas vazões regularizadas pelos reservatórios localizados a jusante da mesma pode ser avaliado comparando as vazões regularizadas com 90% de garantia. Da perspectiva global este impacto é ligeiramente positivo, aumentando em 1% as vazões regularizadas pelo sistema de reservatórios avaliado.

O principal impacto em termos percentuais é registrado na vazão regularizada no reservatório Encanto que apresenta um decréscimo de 11%, equivalente a escassos 26 L/s de vazão regularizada com 90% de garantia. Já em termos absolutos, a maior diminuição da vazão regularizada foi observada no reservatório Santa Cruz do Apodi que apresentou um decréscimo de 154 L/. Este decréscimo representa escassos 3% da vazão regularizada por este reservatório.

Com a análise da Hidrologia do projeto, acrescida de novos dados do período, chegou-se à conclusão teórica de que o sangradouro pode ser calculado em 70m. A maior relevância da implantação da Barragem se reflete no deslocamento espacial da oferta hídrica, não ocorrendo variações significativas na oferta hídrica global da bacia.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**AGÊNCIA NACIONAL DO AGUAS** (Brasil). Diretrizes Para Elaboração de Projetos de Barragens. -- Brasília: ANA, 2016.

**AGUIAR, F. G.** (1978, reprint). Estudo Hidrométrico do Nordeste Brasileiro. Boletim Técnico. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – Dnocs, V. 36, N. 2.

**Portal HidroWeb** <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria>, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico -ANA



**OLIVEIRA, T. C. C., GONÇALVES, F. A.** “Tamanho ideal de séries históricas de vazões mínimas anuais e suas aplicações em estudos hidrológicos: estudo de caso nas regiões hidrográficas Paraná e São Francisco”. Eng. Sanit. Ambient. V. 27, n 4, p. 805-816, 2022.

**OLIVEIRA JÚNIOR, E. T.;** Bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, Bacia: Macroinvertebrados como Bioindicadores e a percepção ambiental dos pescadores e marsiqueiras do seu entorno. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – UFPB, João Pessoa, 2009.

**MILLY, P.C.D.; DUNNE, K.A.; VECCHIA, A.V.** Global pattern of trends in streamflow e water availability in a changing climate. n. 438, n.17, 2005

**NIGATU, Netsanet Tesema; JABIR, Asie Kemal; LIA, Leif; SIGTRYGGSDOTTIR, Fjola G.** (2017). “The impact of freeboard on embankment dams” in Anais do Hydro Africa 2017. Marrakesh, Morocco. Maio 2017.

**SARMENTO, F.J. (1999).** “Adequabilidade de Modelos Estocásticos de Vazão na Simulação de Reservatórios em Regiões Semi-áridas”. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG

**SARMENTO, F.J. (2007).** “Dimensionamento Hidrológico de Reservatórios sob Incertezas: Avaliação estocástica e reflexos financeiros. ” XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo – SP.

**SOUZA, Danilo Nogueira de.** (2014) “Análise dos processos de amortecimento de cheias em reservatórios: parâmetros intervenientes e proposta de método de estimativa”. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

**STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho, CAMPOS, José Nilson B.;** Democratização na Distribuição Espacial de Água no Nordeste Semi-árido e a Eficiência Hidrológica de um Sistema de Reservatórios Superficiais. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa.

**WANDERLEY, Henderson Silva; AMORIM, Ricardo Ferreira Carlos de; CARVALHO, Fred Oliveira de.** “Interpolação espacial de dados médios mensais pluviométricos com redes neurais artificiais”. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. 3, p. 389-396, 2014.

**ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. (2007)** “Analysis of earth dam failures: a database approach” in Anais do First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, China, v. 1, p. 293-302, Out. 2007