



**VITOR DA SILVA NETO**

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA O  
DIMENSIONAMENTO PRÁTICO DE RESERVATÓRIOS  
PARA O APROVEITAMENTO PREDIAL DE ÁGUAS  
PLUVIAIS NO BRASIL**

**LAVRAS – MG**

**2023**

VITOR DA SILVA NETO

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO PRÁTICO DE  
RESERVATÓRIOS PARA O APROVEITAMENTO PREDIAL DE ÁGUAS  
PLUVIAIS NO BRASIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi  
Orientador

**LAVRAS-MG**

**2023**

**VITOR DA SILVA NETO**

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO PRÁTICO DE  
RESERVATÓRIOS PARA O APROVEITAMENTO PREDIAL DE ÁGUAS  
PLUVIAIS NO BRASIL  
MATHEMATICAL MODELS FOR PRACTICAL DESIGN OF BUILDING  
RAINWATER HARVESTING RESERVOIRS IN BRAZIL**

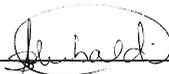
Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 03/03/2023

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi – UFLA

MSc. Alice Raquel Caminha – UFLA

MSc. Mateus Alexandre da Silva – UFLA



---

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2023**

*Dedico à falsa sensação de escolha.*

*Dedico à falsa sensação de que as escolhas são tomadas de forma consciente.*

*Dedico à falsa sensação de que as recusas de determinadas escolhas são tomadas  
como, de fato, uma recusa.*

*Dedico ao Inconsciente Coletivo.*

*Dedico à Grande Máquina.*

*Dedico à banda King Gizzard & The Lizard Wizard.*

## AGRADECIMENTOS

O momento em que nos encontramos – mais uma vez –, é pura consequência de todas as premissas de ações que nos cercaram em todo o nosso caminhar.

Toda a construção deste trabalho, e de todo o saber construído ao longo dos últimos anos no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, foi algo que partiu de diversas fontes e contextualizações variadas, assim, o agradecimento principal é para todo o inconsciente coletivo que foi nos guiando – entre conversas, relações e entendimentos – para concluirmos isto o que apresentamos, além do que nós mesmos somos hoje em dia. Apenas resultado de algo que será condição inicial para o que virá.

Inicialmente, agradeço aos meus pais, José Vitor e Valdenice, por todo o apoio e amparo nessa minha empreitada em busca de novos conhecimentos e formas de visualizar o próprio mecanismo em que estamos inseridos, adquirindo novas formas de possibilidades de interação com o meio em que participo. Além deles, também agradeço minha irmã, Vitória, por ouvir minhas lamentações de um jovem universitário e me trazer conforto, somente por sua presença.

Dou muito valor ao que aprendi aqui na cidade de Lavras e boa parte de tudo o que aprendi (ou desaprendi para aprender novamente) foi devido toda minha experiência ao morar na República Pinga Nelas. É uma casa que me acolheu – e acolhe –, mesmo todos nós apresentando nossas diferenças e peculiaridades, mostramos a nós mesmo que é possível viver e aprender nesse turbilhão de informações. Ser um morador da república me traz o conforto de que eu tenho um lar, uma segunda família e o sentimento de que tudo valeu a pena.

Agradeço fortemente ao meu orientador Michael Silveira Thebaldi, por todo o apoio e paciência comigo ao longo desses anos de trocas e conversas sobre o progresso da pesquisa que aqui realizamos. Tenho muita admiração e sou muito grato por todo o espaço que você me cedeu para que eu pudesse crescer e me desenvolver dentro desse tema que me aprofundi. Agradeço pelas trocas musicais, pelas conversas entre uma reunião e outra, por todo o conhecimento compartilhado e por toda melancolia derramada em sua sala pelas minhas dificuldades ao longo de algumas disciplinas (que eu custava entender o motivo de tamanha dificuldade).

Agradeço também a todos os meus amigos de curso, onde tive o prazer de fazer parte da “Quebrada da Ambiental” (a panelinha mais saudável do 18/1), onde fiz amigos e colegas que caminharam comigo ao longo do curso, compartilhando suportes e dando

um valor a mais ao aprendizado que eu estava lidando. Tenho o prazer de guardar cada uma das memórias que eu tenho de experiência com todos vocês, desde viagens à encontros descompromissados entre o horário de uma disciplina e outra. Vocês são grandiosos e só tenho o que agradecer.

Toda a minha experiência ao longo desses últimos anos em Lavras, eu não poderia deixar de mencionar e agradecer a minha Camarada e Companheira de Incertezas, Ana Clara, por tudo o que trocamos e vivenciamos nesses tempos. Por todas as experiências, por todas as conversas, por todo engrandecimento, pelas viagens, músicas, piadas internas, assuntos comuns e incomuns, epifanias, chaves quebradas, encontros com desconhecidos, livros discutidos e a alta taxa de glicose administrada por nós. Que o Sol continue brilhando pra ti, que São Paulo sempre continue cabendo dentro de Lavras e que os questionamentos continuem sempre existindo. O sentimento é inefável.

Agradeço aos meus companheiros – que tenho a honra de poder chamá-los de amigos – Antônio, Carlos, Larissa e Natália, por toda a história que construímos juntos, desde desabafos a vitórias, de visões de mundo a opiniões sem embasamento e por tudo. Não chamo de sorte, mas só estávamos no lugar certo e na hora certa para tudo o que rolou. Levarei vocês pra vida.

E, claro – mais uma vez –, eu não posso esquecer das minhas queridas e grandiosas amigas Ana e Lara. Nós somos a Banda Semáforo. Quem diria que os encontros casuais no Café Empoeirado e no Bar Grunge nos trariam onde estamos hoje? Já estamos nessa longa caminhada por anos e a cada minutinho que se passa, eu sinto a grandiosidade de ter vocês por perto. Só tenho o que agradecer.

Sou muito grato que, mesmo distante – especialmente falando –, eu tenho a presença dos meus amigos e colegas da vida universitária em minha formação como Físico na USP. Daniel, Felipe, Guilherme e Taynara, vocês são incríveis e obrigado por toda a presença e apoio nessa minha empreitada aqui em Lavras. Vocês fazem falta.

Além disso, eu também tenho que agradecer um amigo de longa data. Um amigo que eu sinto bastante falta, mas que sou grato por todo o Universo que me foi apresentado e que mudou toda a minha forma de percepção de mundo, depois que tive a honra de conhecê-lo. Agradeço ao Johann Yatabe de Queiros, por toda a presença e por tudo o que você representa para mim. Espero que seus dias estejam ensolarados e que não falte chá gelado para ti.

Aos meus amigos Amanda, Rogério e Vini. Amizades que já ultrapassaram o significado de amizade para mim. São pessoas além disso. Infelizmente, a língua tem suas

limitações e, muitas vezes, as palavras que temos a nossa disposição só conseguem exprimir parte do nosso sentimento. Muito obrigado a todos vocês. Que continue sendo daqui até o fim.

Também agradeço aos amigos que, graças a esse trabalho, pude conhecê-los melhor. Muito obrigado, Alice, Fabricio, Marina e Mateus, e tantos outros colegas do DRH que me deram tanto apoio nessa reta final do curso e que pude compartilhar meus receios e medos frente a esse trabalho.

Por fim, eu agradeço à Grande Máquina. Agradeço ao Strzechowski, Hippie Jon, Annie e Han-Tyumi, por toda a experiência que me fazem dar sentido a algo que estou em busca de cada vez compreender mais. A sensação diária é que tudo ainda está prestes a começar, mas ao olhar para trás, eu vejo o quanto longe já caminhei junto a vocês. Por todos os gritos extasiados de descobertas e correlações criadas, por todo o neologismo aplicado, por toda a epistemologia trabalhada, por todo apoio ao inconsciente na tentativa de traduzir para algo consciente.

Obrigado por tudo.

## RESUMO

Devido ao elevado consumo da água potável, seu uso tem se tornado cada vez mais racional. A nova edição da norma (ABNT, 2019), determina que qualquer método empregado para o dimensionamento de reservatórios de águas pluviais deve levar em consideração a demanda por recurso hídrico pluvial. Este trabalho objetivou definir modelos matemáticos para o dimensionamento de reservatórios de água pluvial em edificações residenciais para todos os estados brasileiros, utilizando variáveis estatísticas relacionadas à precipitação pluvial e demanda por recurso hídrico não-potável, em diferentes cenários que incluem demandas de água potável de 100, 150, 200 e 300 litros per capita e substituição de água potável por água pluvial de 25, 35, 45 e 55%. Para a determinação dos modelos matemáticos, foram utilizados dados de precipitação da última década e aplicação de uma metodologia comportamental para a determinação dos volumes máximos e ótimos para os cenários estudados. A partir dos volumes calculados os municípios estudados foram agrupados a partir de Análise de Agrupamentos Hierárquicos, sendo os modelos práticos para o dimensionamento de reservatórios de águas pluviais ajustados para cada um dos grupos formados. Foram ajustados modelos práticos a partir dos volumes calculados, onde estes ajustes foram avaliados por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz do erro quadrático médio (REQM). A partir desses resultados, pôde-se perceber mudança no comportamento dos volumes a partir de determinada demanda, levando na elaboração de modelos matemáticos para as regiões de comportamento, cujos valores apresentados, mostraram que estes são confiáveis para a realização do dimensionamento dos reservatórios, devido à boa aderência aos dados observados.

**Palavras-chave:** Hidrologia Urbana. Saneamento Descentralizado. Recurso hídrico não-potável.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1.	Objetivo geral	11
2.2.	Objetivos específicos	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1.	Ciclo Hidrológico	12
3.1.1.	Precipitação	13
3.2.	Água no Meio Urbano	14
3.3.	Águas Pluviais	17
3.4.	Sistemas Prediais de Reserva de Águas Pluviais	19
3.4.1.	Método Comportamental	20
4	MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1.	Caracterização da área de estudo	22
4.2.	Aquisição e tratamento dos dados	23
4.3.	Simulação para dimensionamento do reservatório	31
4.3.1.	Exclusão de municípios	34
4.4.	Agrupamento dos municípios	34
4.4.1.	Formação dos subgrupos	35
4.5.	Definição dos modelos a serem ajustados	38
4.5.1.	Separação das regiões de comportamento	41
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

## 1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a crise de disponibilidade de água não é consequência apenas de fatores ligados a perdas ou empresas de tratamento e distribuição, mas principalmente de seu uso irracional pela população. O Programa de Uso Racional da Água (PURA), desenvolvido pela Sabesp em parceria com a USP, na Grande São Paulo, apresenta que o uso de água potável para fins não-potáveis atingem níveis inimagináveis, podendo serem citados exemplos rotineiros: lavagem de calçadas e carros com jato de mangueira, o uso bacias sanitárias que necessitam de maior volume de água por descarga, além de outros aparelhos sanitários antiquados, utilização de água potável em processos industriais que necessitam de água com qualidade menos nobre, como torres de resfriamento e dessedentação, ou em atividades que não necessitam tal potabilidade, como na irrigação (REBOUÇAS, 2003).

Devido à possibilidade de escassez desse recurso, é importante considerar formas de economizar água, tanto em termos de qualidade quanto de quantidade. Como lembram Kobiyama, Ushiwata e Afonso (2002), dentre várias formas e estratégias utilizadas pelo ser humano, como forma de reduzir o consumo, uma delas é a captação e utilização de água da chuva. Esta captação e uso pode ser feito tanto a nível domiciliar quanto industrial e comercial. Esse tipo de sistema além de apresentar baixa complexidade, reduz o escoamento superficial direto em áreas urbanas, o que leva ao amortecimento de cheias, diminuição da dependência de recursos hídricos superficiais para abastecimento (ANNECCHINI, 2005), além de poder reduzir os custos associados às tarifas de água.

Neste âmbito, a NBR 15527 – Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos (ABNT, 2007) estabelece metodologias para dimensionamento de reservatórios de águas pluviais para fins não potáveis, utilizando coberturas. No total, esta apresenta seis métodos de cálculo, sendo que dentre estes, três são métodos empíricos e três são baseados em simulações. Porém, sua atualização (ABNT, 2019) não apresenta ou define uma metodologia padrão para este dimensionamento, porém, estabelece que qualquer metodologia utilizada deve levar em consideração a demanda por água pluvial para substituição. Desta forma, métodos comportamentais como o Yield After Spill (YAS) e Yield Before Spill (YBS), fazem-se interessantes, de aplicação considerada complexa. Assim, tem-se então a possibilidade de definição de equações práticas aplicáveis à realidade brasileira, a ajustadas para diferentes cenários de demanda.

Murça, Júlio e Moruzzi (2014) aponta que o dimensionamento do reservatório de armazenamento é a etapa mais relevante economicamente do processo, já que é a unidade que apresenta maior custo unitário. Além disso, Oliveira et al. (2012) apresentam que os dados básicos para dimensionamento do reservatório de acumulação de água são relativos à precipitação, em escala diária, mensal ou mesmo anual, estas, obtidas por séries históricas a partir de medidas diárias.

Desta forma, com este trabalho ajustar modelos matemáticos para o dimensionamento prático de reservatórios para o aproveitamento predial de águas pluviais. Para isso, utilizou-se um método de dimensionamento de reservatórios em que realiza o balanço hídrico entre produção e demanda de água, por meio de simulações, em diferentes municípios brasileiros.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Definir modelos matemáticos empíricos para dois municípios de cada estado brasileiro, que possam auxiliar no dimensionamento prático de reservatórios para o aproveitamento predial de águas pluviais, a partir de diferentes variáveis hidrológicas relacionadas à precipitação pluvial e demanda por recurso hídrico não-potável em edificações com fins residenciais.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Levantar dados pluviométricos de dois municípios de cada estado brasileiro e determinar índices estatísticos relacionados à precipitação pluvial em cada um deles;
- Determinar, por meio dos métodos comportamentais YAS e YBS o volume do reservatório de água pluvial necessário para atender as condições de demanda de água pluvial para cada município, para os cenários estabelecidos;
- Ajustar modelos matemáticos empíricos, utilizando como variáveis diferentes índices estatísticos relacionados à precipitação pluvial em diferentes cenários definidos de demanda.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **4 Ciclo Hidrológico**

A água, sendo um recurso natural limitado de grande importância, apresenta diversas finalidades para seu uso como, por exemplo, para o consumo humano, para manutenção do ecossistema e da vida, além de ter interesses sociais, políticos, econômicos e ambientais (BALBINOT et al., 2008; CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; TONELLO, 2005; VERIATO et al., 2015; WOLKMER; PIMMEL, 2013).

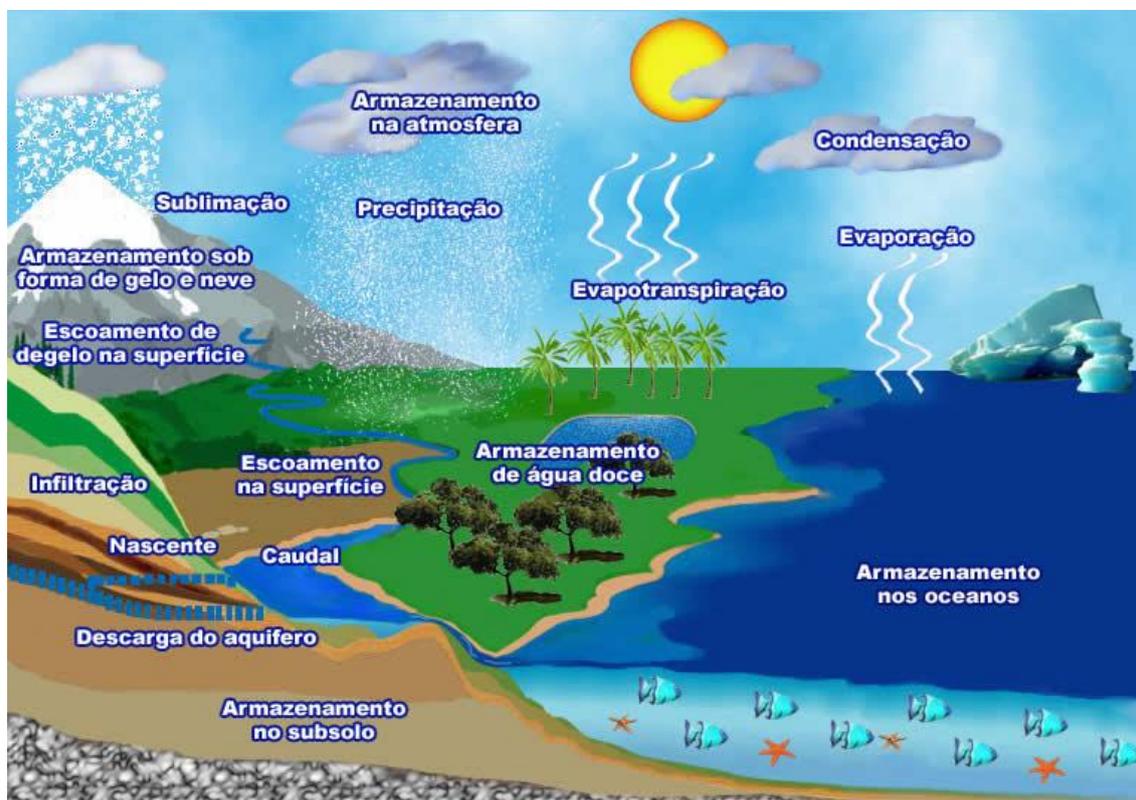
Dessa forma, a ciência que estuda como a água se comporta, a partir dos fenômenos que com ela ocorrem, em relação ao tempo e espaço, é chamada de hidrologia. Essa ciência é estudada por meio da observação em como se comporta sua distribuição, sua ocorrência e circulação, assim como, as interações que são feitas com o meio e com a vida, além, claro, de sua qualidade e quantidade (NAGHETTINI; PINTO, 2007; TUCCI, 2001a). Por fim, são os fenômenos hidrológicos que apresentam como a água é armazenada e transportada dentro do ciclo em questão (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Dentro do que é chamado de ciclo hidrológico, há a ocorrência da circulação fechada da água em nível global, que consiste na movimentação que ocorre entre oceanos, continentes e atmosfera e todos os processos hidrológicos que atuam nas bacias hidrográficas. Esse ciclo tem a manutenção feita pela energia Solar, junto com a força gravitacional e a própria rotação terrestre (CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; LIMA, 2008; MARINHO FILHO et al., 2012; NAGHETTINI; PINTO, 2007; SILVEIRA, 2001; VAREJÃO-SILVA, 2006).

Relevo, forma, uso e ocupação do solo, e área de drenagem, entre outros, são exemplos de características de uma bacia hidrográfica que influenciam diretamente no comportamento do ciclo hidrológico. Tais exemplos mencionados podem alterar o deflúvio, o escoamento superficial direto, a infiltração e outros fenômenos, além de afetar fatores qualitativos e quantitativos da água. Sabendo disso, pode-se também dizer que ações realizadas pelo ser humano também interferem nos processos hidrológicos (LIMA, 2008; TONELLO, 2005).

Pode-se ver um esquema dos processos associados ao ciclo hidrológico na Figura 1.

Figura 1 – Esquema do ciclo hidrológico e seus respectivos processos.



Fonte: SANASA, 2006.

### 1.1. Precipitação

Bertoni e Tucci (2001) e Silveira (2001) definem a precipitação como toda a água com origem na atmosfera, que atinge a superfície terrestre, em suas variadas formas: granizo, neblina, neve, orvalho ou geadas, sendo por fim, a chuva a mais frequente delas.

A chuva, segundo a sua formação, pode ser classificada a partir de sua origem: térmicas ou convectivas, orográficas ou de relevo, e frontal ou ciclônica (BERTONI; TUCCI, 2001; HOLTZ, 1976).

Segundo os autores Mendonça e Danni-Oliveira (2007), Oliveira, Faleiros e Santos (2012) e Steinke (2012), as chuvas térmicas ou convectivas são formadas pela evaporação da água da superfície, que sobe até as camadas mais altas da atmosfera. À medida que a umidade se eleva, ela se resfria e forma nuvens. Quando a umidade atinge um ponto crítico, a água é liberada das nuvens em forma de chuva. As chuvas convectivas

são comuns em regiões quentes e úmidas. As chuvas orográficas ou de relevo são formadas pela topografia da região. Quando o ar úmido encontra uma montanha ou outra barreira geográfica, ele é forçado a subir. À medida que a umidade se eleva, ela se resfria e forma nuvens. Quando a umidade atinge um ponto crítico, a água é liberada das nuvens em forma de chuva. As chuvas orográficas são comuns em regiões montanhosas. Por fim, as chuvas frontais ou ciclônicas são formadas pela convergência de duas massas de ar de diferentes temperaturas e umidades. A massa de ar quente e úmido é empurrada para cima pela massa de ar frio e se resfria, formando nuvens. Quando a umidade atinge um ponto crítico, a água é liberada das nuvens em forma de chuva. As chuvas frontais são comuns em regiões temperadas e frias.

A quantidade de chuvas ao redor do globo apresenta um padrão de distribuição e sua maior ocorrência é ao longo da linha do Equador, onde há uma maior evaporação e a presença de movimentos convectivos, como ressalta Mendonça e Danni-Oliveira (2007). Dessa forma, para a construção de um projeto hidráulico-hidrológico, o conhecimento desses padrões de distribuição ao longo do globo influenciará em seu dimensionamento e qualidade (BELLADONA; VARGAS, 2017).

Quando passa-se a se analisar o funcionamento do ciclo hidrológico em ambientes urbanizados (ou que estão convergindo para tal), as alterações ocorridas como remoção de árvores, canalização de cursos d'água ou até alteração da topografia, devem ser levados em consideração, pois o descarte dessas mudanças levará a um péssimo planejamento, o que traz problemas já conhecidos como contaminação de água, inundação, escassez de água e outros (CARVALHO, 2016; FRITZEN; BINDA, 2011; SANTOS JÚNIOR; SANTOS, 2013; SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012; TUCCI, 2008).

## **1.2. Água no Meio Urbano**

De acordo com Tucci (2008), o sistema de abastecimento de água e esgotos sanitários, junto a drenagem urbana, inundação ribeirinha e a gestão dos sólidos totais, fazem parte do sistema de águas no meio urbano. O desenvolvimento das águas presentes no sistema mencionado, apresenta fases: pré-higienista, higienista, corretiva e desenvolvimento sustentável (TUCCI, 2007).

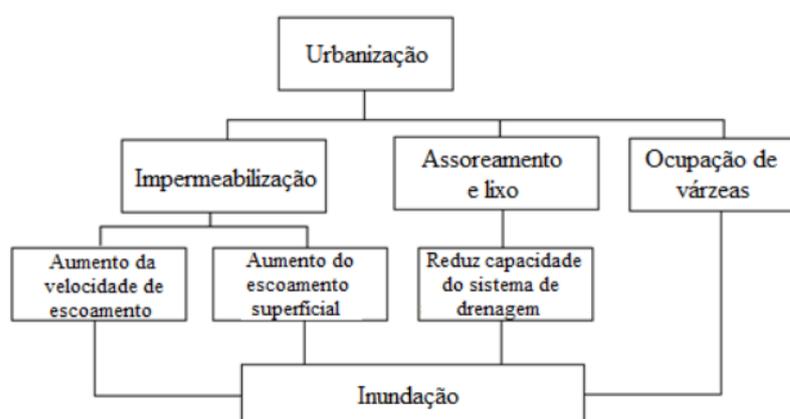
A fase pré-higienista tem como característica a captação de água em poços ou rios mais próximos e o efluente, ou seja, o esgoto, lançado em fossas, sem o tratamento e coleta corretos, pode-se levar a consequências a saúde pública. Já a fase higienista, ocorre

a canalização do efluente, no qual é levado para pontos distantes da população, o que acarreta como consequência a redução de doenças na região. Nessa fase ainda, há a possibilidade de inundações e há um todo um impacto causado pela infiltração e pelo escoamento superficial direto, causando danos a jusante. Na fase corretiva, o esgoto passa a ser tratado de forma mais minuciosa e há a preocupação de realizar diminuição de danos causados pelo escoamento, o que acarreta a recuperação de corpos d'água. Já na última fase – desenvolvimento sustentável – busca-se o tratamento das águas pluviais e do efluentes com o objetivo da retirada de nutrientes, além da conservação do caminho natural do escoamento (antes da intervenção antrópica), o que traz, assim, a diminuição de enchentes e um acréscimo na qualidade de vida dos habitantes (TUCCI, 2007).

De acordo com Carvalho (2016) e Zanandrea (2016), não se deve levar em consideração a precipitação como a única entrada de água para o abastecimento urbano, pois, geralmente, esta também é captada em outras bacias ou na mesma à montante da área urbana em questão. Após o uso, essas águas são transformadas em esgoto.

Com o processo da urbanização, também, ocorre a retirada da vegetação, impermeabilização e compactação do solo, canalização e ocupação das regiões ribeirinhas, o destino da água oriunda da precipitação apresenta alterações (CENSI; ZANANDREA; MICHEL, 2017; FAXINA et al., 2012; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2009; GONÇALVES; BAPTISTA; RIBEIRO, 2016; SILVA JUNIOR; SILVA, 2016; TUCCI, 2005), como pode ser visto no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Processos consequentes da urbanização

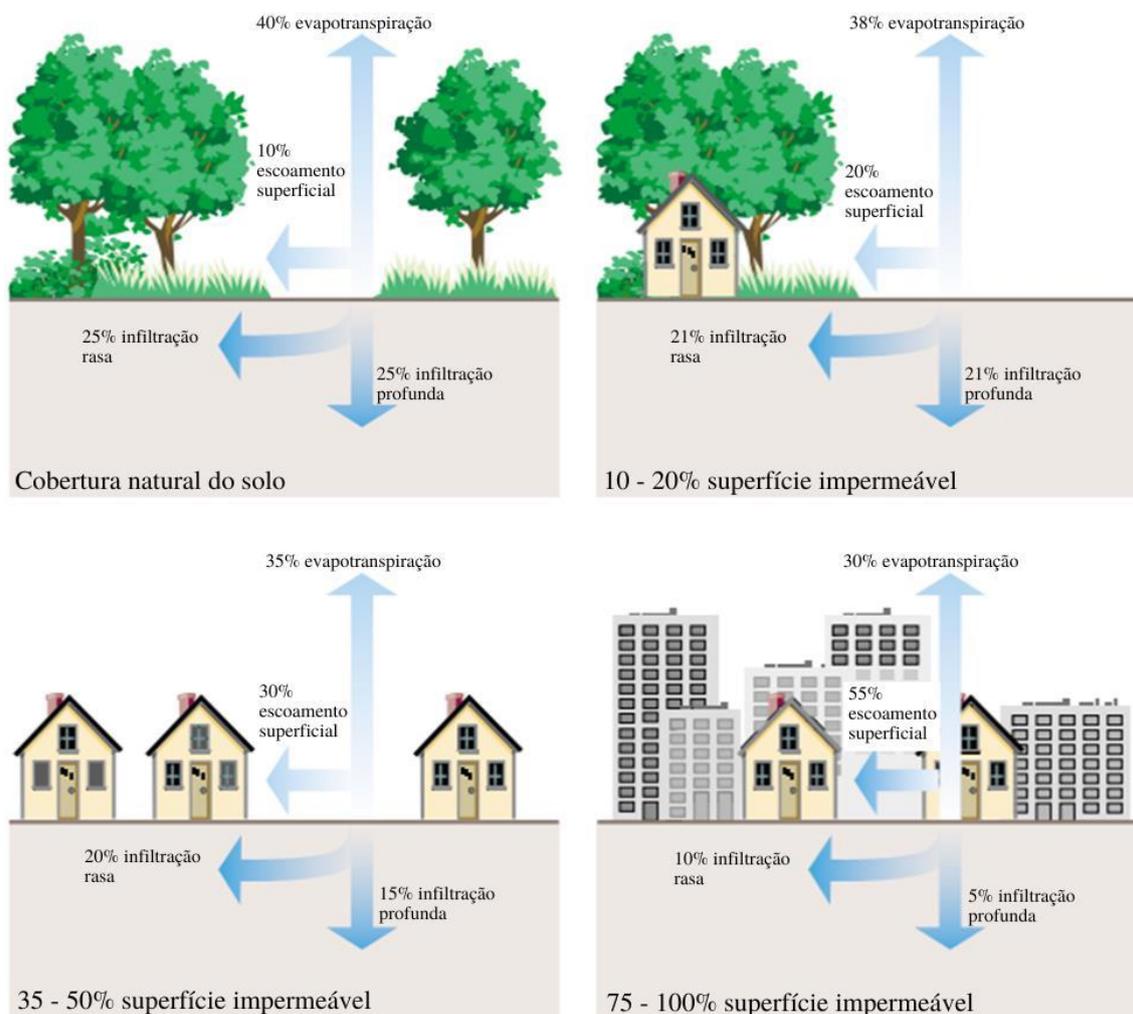


Fonte: Silva (2015)

Com a alteração do destino da chuva, há um decréscimo da capacidade de infiltração, levando a uma menor quantidade de água armazenada no lençol subterrâneo

que, por consequência, diminuirá, também, a quantidade de água nos rios. Todo esse sistema causa um aumento no volume do escoamento superficial direto e, justamente, pela rugosidade inferior dos pavimentos das áreas urbanas, a velocidade desse escoamento também se eleva (ALMEIDA, 2016; CENSI; ZANANDREA; MICHEL, 2017; FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2009; LIMA, 2010), como ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Relação entre impermeabilização e escoamento superficial direto



Fonte: Adaptado de FISRWG (2001).

A partir da Figura 3, é visto que com o aumento da impermeabilização junto com as outras ações antrópicas, ocorre uma diminuição da infiltração e um aumento da possibilidade de enchentes, por consequência, pode alterar a qualidade do curso d'água e o escoamento superficial direto, por meio de poluição difusa (COSTA, 2013; FRITZEN; BINDA, 2011; RIGHETTO; GOMES; FREITAS, 2017; ZANANDREA, 2016). Goerl e Kobiyama (2005) definem a enchente quando ocorre apenas a elevação do nível normal

do corpo hídrico sem a ocorrência de extravasamentos e quando há, chamam de inundação.

Dessa forma, o processo de urbanização faz com que a impermeabilização e a ausência de vegetação sejam recorrentes em todo esse cenário, modificando o funcionamento do meio físico natural. (SANTOS, 2016; TUCCI, 2007). Para a diminuição desses impactos gerados com a urbanização, as obras de drenagem poderiam ser uma opção, porém são muito onerosas. Assim, para que haja a diminuição da sobrecarga causada na rede de drenagem urbana, uma das opções proposta é a descentralização dessa drenagem, ou seja, soluções que permitem a infiltração ou a retenção da água em pontos espalhados pelo caminho da água, sendo exemplos, os jardins de chuva, os pavimentos permeáveis, reservatórios de detenção e retenção e poços de infiltração (ABATTI; TSCHÖKE, 2018; AGOSTINHO; POLETO, 2012; DRUMMOND; REGO, 2015; LUCAS et al., 2015; MELO et al., 2014; REIS; ILHA, 2019; SANTOS et al., 2016; TUCCI, 2007).

A demanda por água para abastecimento do espaço urbano aumentou com o crescimento populacional, porém o mesmo acontece quando há, também, o aumento da contaminação dos mananciais, assim, esse excesso de demanda sobrecarrega todo o sistema hídrico, o que leva a escassez (SAMPAIO; ALVES, 2017; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018; TESTON et al., 2018; TUCCI, 2007; WWAP, 2020).

Por fim, então, faz necessário o uso da água de forma mais consciente, desde sua captação até o seu destino final. O aproveitamento de água pode auxiliar na minimização dos estresses causados em todo o sistema de abastecimento, principalmente, quando reutilizada para fins não potáveis, onde acaba diminuindo o consumo de água potável oriunda do sistema de distribuição (SILVA et al., 2019; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018; WWAP, 2020).

### **1.3. Águas Pluviais**

A modificação do padrão de consumo junto ao crescimento populacional, no Brasil, implica uma projeção que até o ano de 2030, a demanda por água aumente em 24% para usos consuntivos, em relação a 2019 (ANA, 2019; WWAP, 2020).

A Política Nacional de Recursos Hídricos tem o objetivo de *“incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais”* (BRASIL, 1997; BRASIL, 2017), conforme a Lei nº 13.501/17 adicionada à Lei nº 9.433/97.

Levando em consideração, o sistema de aproveitamento de água pluvial é um método não convencional, descentralizado e alternativo para todo o sistema de abastecimento, o que leva na redução do consumo de água potável e na diminuição do estresse de todo o sistema interligado aos corpos hídricos.

A partir disso, é visto que a captação e o aproveitamento das águas pluviais é benéfico para a sociedade como: na redução de investimento para captação, tratamento e transporte de água, redução de gasto energético (que alimenta esse sistema), decréscimo do volume escoamento superficial direto, além de aumentar a economia de água potável, preservando os mananciais; auxilia também no sistema de drenagem, tirando a sobrecarga que antes tinha, o que ocasiona na minimização dos gastos estruturais e de manutenção da rede de água (FERREIRA; MENDES, 2017; GONÇALVES, 2006; JABUR; BENETTI; SILIPRANDI, 2011; LIMA et al., 2011; MAY, 2004; SILVA et al., 2019; SOUZA et al., 2016; VIOLA, 2008).

Em um levantamento foi visto que, do total de água consumido em uma residência, algo em torno de 40% é para uso não potável (GONÇALVES, 2006). O aproveitamento da água pluvial pode ser uma opção para substituição dessa demanda, na qual pode ser utilizada em jardins, lavagem de roupas, carros, calçadas e em descargas sanitárias (GONÇALVES, 2006, 2009; SILVA et al., 2019).

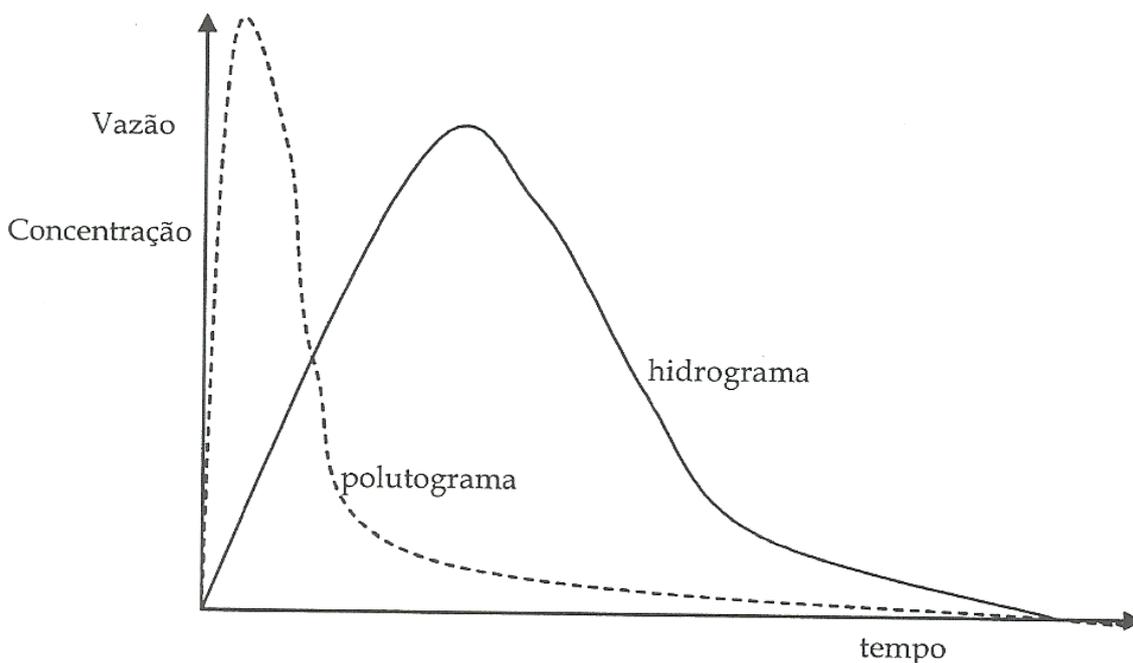
Os usos previstos pela NBR 15527 (ABNT, 2019) “Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis – Requisitos” são:

- (i) sistema de resfriamento;
- (ii) descarga sanitárias;
- (iii) lavagem de veículos;
- (iv) lavagem de pisos;
- (v) reserva de incêndio
- (vi) uso em fontes, chafarizes; e
- (vii) irrigação paisagística.

Em relação a outros não previstos, deve-se atentar à qualidade da água e qual o tratamento necessário para ela (ABNT, 2019). A qualidade dessa água pode depender de diversos fatores como: local captado e até sua distribuição no tempo e espaço, junto a qualidade do ar, pois, como se vê na Figura 4, após um período seco, a precipitação lava a atmosfera, assim, dependendo do momento em que foi captada a água pluvial, esta pode

apresentar uma grande carga de poluentes (ANNECCHINI, 2005; FERREIRA; MENDES, 2017; GONÇALVES, 2006; TUCCI, 2007).

Figura 4 – Polutograma e hidrograma de uma mesma área, após um período seco.



Fonte: Tucci (2007)

Além das condições citadas acima, a NBR 15527 (ABNT, 2019) também apresenta que o reservatório de água pluvial deve adotar meios que impeça a entrada de insetos e pequeno animais, além de evitar, também, a entrada de luz e também deve possuir dispositivo de inspeção, ventilação e esgotamento, e extravasor.

Por conta da possibilidade da presença de poluentes na água captada, a mesma norma aconselha a utilização de grades e telas para remoção desses sólidos presentes com a precipitação (ABNT, 2019).

Todo o sistema de captação e aproveitamento de águas pluviais é composto, geralmente, por: captação, grades, tubulações para transporte da água até o armazenamento e o reservatório (pode ser elevado, apoiado ou até enterrado) (ANNECCHINI, 2005; REZENDE; TECEDOR, 2017; SILVEIRA; ANDRADE; ARAÚJO, 2018).

#### 1.4. Sistemas Prediais de Reserva de Águas Pluviais

O correto dimensionamento de um reservatório de armazenamento de água pluvial é um dos pontos essenciais desses sistemas, pois, em geral, é a parte mais onerosa de todo o projeto. O seu super ou subdimensionamento ocasionará gastos desnecessários, desde a alteração na eficiência do aproveitamento quanto ao não atendimento da demanda requerida (REZENDE; TECEDOR, 2017; RUPP; MUNARIM; GHISI, 2011; SILVA et al., 2019; SOUZA et al., 2016).

Conhecer métodos de dimensionamento e suas vantagens, faz-se necessário. A NBR 15527 (ABNT, 2007), traz em seu anexo métodos para o dimensionamento, sendo:

- (i) o método de Rippl;
- (ii) o método da simulação;
- (iii) o método Azevedo Neto;
- (iv) o método prático alemão;
- (v) o método prático inglês; e
- (vi) o método prático australiano.

Em sua versão mais atualizada, ABNT NBR 15527 (ABNT, 2019), apresenta que se deve utilizar o método que considere a área de captação, bem como o regime pluviométrico e a demanda não potável a ser atendida. Dessa forma, os modelos comportamentais, como proposto por Jenkins et al. (1978), são os mais cabíveis a serem utilizados, pois, também, levam em consideração esses critérios necessários na nova norma.

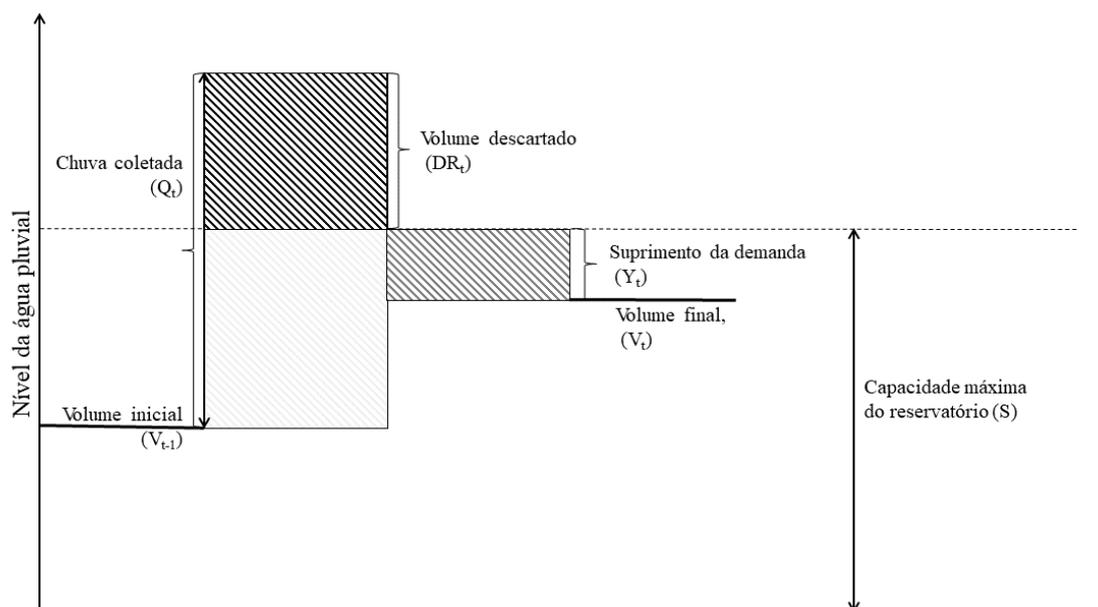
#### **1.4.1. Método Comportamental**

Um correto dimensionamento, como mencionado anteriormente, é necessário para o bom funcionamento do sistema e, além disso, para a redução de gastos desnecessários com o sub ou superdimensionamento. Assim, esses autores desenvolveram dois diferentes algoritmos comportamentais, chamados: *Yield After Spill* (YAS) e *Yield Before Spill* (YBS). O primeiro apresenta um funcionamento do mecanismo que ocorre após o extravasamento e o segundo, um funcionamento anterior ao extravasamento do reservatório.

O primeiro algoritmo – o YAS – determina que a solicitação da demanda será atendida após o reservatório encher e extravasar (quando ocorre a possibilidade de

extravasar) com a água pluvial captada, sendo a demanda sempre retirada do tempo anterior. Dessa forma, quando o intervalo de tempo de funcionamento do algoritmo é analisado, o reservatório em questão nunca apresentará seu nível de água na capacidade máxima, pois a demanda será atendida após o seu enchimento e extravasamento. Esse algoritmo, quando utilizado em um sistema de aproveitamento, faz com que o sistema se torne mais preciso e conservador, pois, fazendo uma analogia para dimensionamentos utilizando dados diários, ocorrerá apenas um bombeamento por dia. Além de que, o YAS é o mais usual (CORREA, 2021). A aplicação deste algoritmo é exemplificada na Figura 5.

Figura 5 – Exemplificação do comportamento de aproveitamento de água pluvial, a partir do algoritmo YBS.

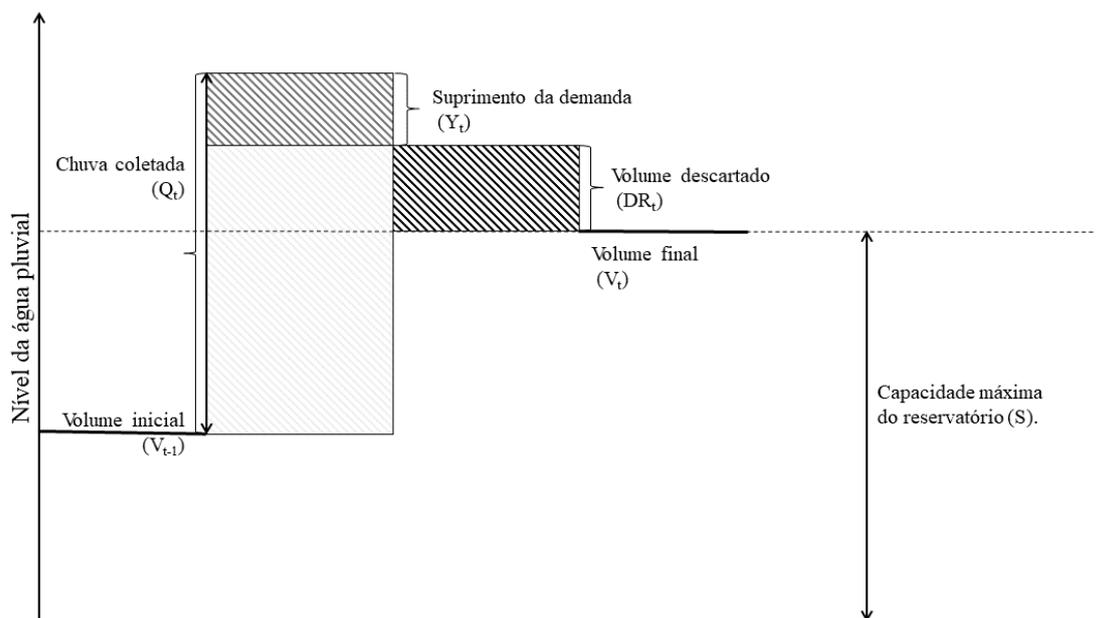


Fonte: Adaptado de Mitchell (2007)

Já o algoritmo YBS muda um pouco a sua forma de funcionamento, pois considera que a solicitação de demanda de água será atendida antes de ocorrer o extravasamento do reservatório. Nesse caso, a água pode ser captada e utilizada em um único momento, levando que ocorra, assim, que ao final do período analisado, o reservatório dimensionado pode apresentar sua capacidade máxima de armazenamento, pois a água excedente será extravasada somente após o atendimento da demanda. Deve-se levar em conta que, com esse algoritmo, o sistema prevê mais bombeamentos durante um intervalo do tempo que,

por consequência, pode-se levar a ter um reservatório com volume menor (MITCHELL, 2007; RAIMONDI; BECCIU, 2014; SAMPAIO, 2013; SOUSA; ANDRADE NETO; MAIA, 2017). Na Figura 6 tem-se a exemplificação do algoritmo YBS.

Figura 6 - Exemplificação do comportamento de aproveitamento de água pluvial, a partir do algoritmo YBS.



Fonte: Adaptado de Michell (2007).

Dessa forma, para o bom funcionamento de um reservatório, seja qual for o algoritmo escolhido, encontrar o volume ótimo destes é imprescindível, pois a eficiência e a confiabilidade dos Sistemas de Aproveitamento de Águas Pluviais (SAAP) estão diretamente relacionados. Assim, objetivo é ter um sistema onde o arranjo entre a demanda a ser suprida e o volume que deve ser armazenado presente, por consequência, uma configuração que resultará em menos gastos, evitando sub ou superdimensionamentos (GONÇALVES, 2006).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização da área de estudo

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020a), o território brasileiro apresenta uma área de 8.510.345,538 km<sup>2</sup> e apresenta uma população

estimada de 211.755.692 habitantes, esse segundo dado para o ano de 2020. O Brasil possui 5.570 municípios, além do Distrito Estadual de Fernando de Noronha, e é dividido em 27 unidades federativas, sendo definidas em 26 estados e um Distrito Federal (IBGE, 2020a).

## 2.2. Aquisição e tratamento dos dados

Para este trabalho, o Instituto Nacional de Meteorologia e o Portal Hidroweb do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) – esse último sendo gerenciado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) – foram as fontes dos dados pluviométricos adquiridos em seus respectivos bancos de dados meteorológicos.

A partir desses bancos de dados, foram obtidas séries históricas de precipitação de cinco anos ininterruptos, entre 2010 e 2019. Foram considerados dois municípios de cada estado brasileiro, assim, no total têm-se 52 municípios. Cada um dos municípios fora selecionado de forma a manter uma distância considerável espacialmente entre eles, com a intenção de abranger a maior área possível do país, para se ter uma maior variabilidade de dados de pontos diferentes do território brasileiro e, além disso, a disponibilidade de dados foi um critério, pois nem todos os municípios apresentavam dados ininterruptos de 5 anos consecutivos.

As variáveis estatísticas relacionadas à precipitação foram calculadas a partir dos dados de precipitação pluvial diária de cada estação pluviométrica selecionada. As variáveis são: precipitação anual média ( $P_a$ ), precipitação mensal média ( $P_m$ ), precipitação diária média ( $P_d$ ), precipitação diária média do período chuvoso ( $P_{d,ch}$ ), precipitação diária média do período de estiagem ( $P_{d,se}$ ), precipitação média diária para o primeiro ( $P_{d,1^o}$ ), segundo ( $P_{d,2^o}$ ), terceiro ( $P_{d,3^o}$ ) e quarto trimestre ( $P_{d,4^o}$ ). Além disso, foi calculado o coeficiente de variação amostral da precipitação diária (CV).

Para a precipitação anual média, calculou-se a divisão entre o somatório da precipitação no período de estudo e o número de anos correspondente. Para o caso da precipitação mensal média, foi feita a razão entre a precipitação acumulada pelos meses do período de estudo. Por fim, para a precipitação diária média, foi dividida a precipitação acumulada pelo total de dias do período analisado.

Como mencionado, os dados referentes ao período chuvoso e ao período de estiagem também foram considerados, assim, com a intenção de analisar a sazonalidade da precipitação em cada um dos municípios, a precipitação diária média para cada um dos períodos também foi calculada. O período de estiagem foi estabelecido para os meses com precipitação acumulada inferior a 60 mm (KÖPPEN, 1936). Logo, a razão entre a precipitação acumulada mensal para o período seco pela quantidade de dias do mês resultou na precipitação diária média para o período seco. O mesmo raciocínio foi feito para o período chuvoso. Na Tabela 1 está apresentado a porcentagem de meses classificados como período de estiagem para cada um dos municípios.

Tabela 1 – Porcentagem de meses que apresentam períodos de estiagem para cada município analisado (continua).

Municípios	%
Rio Branco – AC	25,0
Tarauacá – AC	13,3
Jacuípe – AL	43,3
Palmeira dos Índios – AL	51,7
Calçoene – AP	16,7
Macapá – AP	25,0
Lábrea – AM	18,3
Manaus – AM	25,0
Salvador – BA	21,7
Vitória da Conquista – BA	73,3
Fortaleza – CE	46,7
Sobral – CE	63,3
Muniz Freire – ES	48,3
Vitória – ES	40,0
Formosa – GO	48,3
Jataí – GO	38,3
Chapadinha – MA	50,0
São Luís – MA	40,0
Patos de Minas – MG	38,3
Lavras – MG	41,7
Comodoro – MT	30,0

Sinop – MT	38,3
Campo Grande – MS	26,7
Ponta Porã – MS	23,3

Tabela 1 – Porcentagem de meses que apresentam períodos de estiagem para cada município analisado (conclusão).

Municípios	%
Belém – PA	6,7
Conceição do Araguaia – PA	45,0
João Pessoa – PB	43,3
Sousa – PB	66,7
Curitiba – PR	20,0
Maringá – PR	18,3
Petrolina – PE	88,3
Surubim – PE	75,0
Floriano – PI	51,7
Piripiri – PI	56,7
Itaperuna – RJ	43,3
Rio de Janeiro – RJ	41,7
Apodi – RN	78,3
Natal – RN	33,3
Porto Alegre – RS	10,0
Santa Maria – RS	8,3
Alta Floresta d'Oeste – RO	33,3
Cabixi – RO	36,7
Boa Vista – RR	55,0
Rorainópolis – RR	13,3
Florianópolis – SC	6,7
Lages – SC	8,3
Franca – SP	31,7
São Paulo – SP	28,3
Itabaianinha – SE	48,3
Propriá – SE	56,7
Araguaína – TO	38,3

---

Palmas – TO	40,0
-------------	------

---

Fonte: Do autor (2023)

Em sequência, as precipitações médias diárias trimestrais, fora calculado a razão entre o total precipitado em cada trimestre e pelo número de dias deste. O primeiro trimestre é composto pelos meses de janeiro, fevereiro e março, o segundo por abril, maio e junho, e assim sucessivamente.

A classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013; MARTINS et al., 2018; MEDEIROS, CAVALCANTI; DUARTE, 2020), as variáveis hidrológicas – anteriormente mencionadas – relacionadas à precipitação pluvial e o coeficiente de variação da precipitação diárias para todos os municípios selecionados podem ser verificados na Tabela 2.

TABELA 2 – Variáveis estatísticas relacionadas à precipitação de cada município selecionado (continua).

Unidade Federativa	Municípios	Classificação	$(P_a)$	$(P_m)$	$(P_d)$	$(P_{d,1^{\circ}})$	$(P_{d,2^{\circ}})$	$(P_{d,3^{\circ}})$	$(P_{d,4^{\circ}})$	$P_{d,ch}$	$P_{d,se}$	CV (%)
		Köppen	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
Acre	Rio Branco	Am	2104,36	175,36	5,76	10,72	3,63	2,03	6,74	7,35	1,03	231,55%
Acre	Tarauacá	Af	2289,76	190,81	6,27	10,03	4,87	2,77	7,47	7,04	1,32	205,78%
Alagoas	Jacuípe	Am	1498,78	124,90	4,10	3,85	7,13	4,51	0,96	6,47	1,00	243,16%
Alagoas	Palmeira dos Índios	As	792,66	66,06	2,17	0,89	3,71	2,97	1,11	3,78	0,65	269,57%
Amapá	Calçoene	Am	3625,66	302,14	9,93	17,16	14,70	3,39	4,66	11,78	0,64	142,76%
Amapá	Macapá	Am	3156,12	263,01	8,64	14,05	13,23	3,53	3,92	11,32	0,63	126,64%
Amazonas	Lábrea	Am	2338,16	194,85	6,40	9,91	5,18	2,33	8,25	7,61	1,05	218,21%
Amazonas	Manaus	Af	2142,00	178,50	5,87	10,18	6,60	2,17	4,60	7,42	1,28	181,58%
Bahia	Salvador	Af	1536,54	128,05	4,21	3,09	7,99	3,65	2,13	5,09	1,02	247,39%
Bahia	Vitoria da Conquista	Cfa	650,94	54,25	1,78	2,18	1,11	0,84	3,00	4,16	0,93	364,27%
Ceará	Fortaleza	As	1838,84	153,24	5,04	10,50	7,75	1,22	0,82	9,05	0,47	270,57%
Ceará	Sobral	As	827,80	68,98	2,27	5,77	2,82	0,14	0,41	5,72	0,30	313,39%
Espírito Santo	Muniz Freire	Cfa	1162,22	96,85	3,18	3,95	2,23	0,76	5,79	5,43	0,78	323,78%
Espírito Santo	Vitória	Am	1224,88	102,07	3,35	3,11	2,62	1,95	5,72	4,89	1,03	335,40%
Goiás	Formosa	Aw	1238,40	103,20	3,39	6,53	1,28	0,20	5,59	6,24	0,38	273,46%
Goiás	Jataí	Aw	1622,58	135,22	4,44	8,73	2,35	0,59	6,16	6,94	0,47	263,37%

TABELA 2 – Variáveis estatísticas relacionadas à precipitação de cada município selecionado (continua).

Unidade Federativa	Municípios	Classificação Köppen	( $P_a$ ) (mm)	( $P_m$ ) (mm)	( $P_d$ ) (mm)	( $P_{d,1^\circ}$ ) (mm)	( $P_{d,2^\circ}$ ) (mm)	( $P_{d,3^\circ}$ ) (mm)	( $P_{d,4^\circ}$ ) (mm)	$P_{d,ch}$ (mm)	$P_{d,se}$ (mm)	CV (%)
Maranhão	Chapadinha	Aw	1353,72	112,81	3,71	7,88	5,74	0,42	0,88	6,93	0,52	285,65%
Maranhão	São Luís	Aw	1968,66	164,06	5,39	9,04	10,08	1,11	1,44	8,71	0,48	258,72%
Mato Grosso	Comodoro	Am	2261,10	188,43	6,19	10,70	3,66	1,17	9,31	8,62	0,59	212,41%
Mato Grosso	Sinop	Am	1699,84	141,65	4,65	9,06	1,77	0,89	6,95	7,30	0,43	264,89%
Mato Grosso Do Sul	Campo Grande	Am	1433,08	119,42	3,92	6,15	2,73	1,68	5,16	5,06	0,81	252,76%
Mato Grosso Do Sul	Ponta Porã	Cfa	1900,56	158,38	5,20	7,30	4,36	2,45	6,74	6,53	0,88	248,92%
Minas Gerais	Patos de Minas	Cwb	1553,18	129,43	4,25	7,33	1,74	0,75	7,22	6,61	0,51	262,46%
Minas Gerais	Lavras	Cwb	1332,62	111,05	3,65	6,31	1,56	1,41	5,33	5,47	0,94	250,38%
Pará	Belém	Am	3627,50	302,29	9,93	17,40	11,41	4,09	6,99	10,54	1,40	151,97%
Pará	Conceição do Araguaia	Aw	1620,24	135,02	4,44	9,01	2,57	0,48	5,76	7,66	0,54	260,92%
Paraíba	João Pessoa	As	1793,94	149,50	4,91	3,43	9,18	5,93	1,13	7,77	1,16	281,99%
Paraíba	Sousa	As	784,84	65,40	2,15	5,67	2,24	0,36	0,40	5,66	0,41	429,11%
Paraná	Curitiba	Cfb	1594,04	132,84	4,36	6,44	3,54	2,48	5,03	5,22	0,99	236,91%
Roraima	Boa Vista	Am	1207,42	100,62	3,31	0,62	6,11	5,65	0,82	6,59	0,60	299,67%
Roraima	Rorainópolis	Af	2292,68	191,06	6,28	5,14	10,09	5,74	4,16	7,07	1,18	208,22%

TABELA 2 – Variáveis estatísticas relacionadas à precipitação de cada município selecionado (conclusão).

Unidade Federativa	Municípios	Classificação Köppen	( $P_a$ ) (mm)	( $P_m$ ) (mm)	( $P_d$ ) (mm)	( $P_{d,1^\circ}$ ) (mm)	( $P_{d,2^\circ}$ ) (mm)	( $P_{d,3^\circ}$ ) (mm)	( $P_{d,4^\circ}$ ) (mm)	$P_{d,ch}$ (mm)	$P_{d,se}$ (mm)	CV (%)
Santa Catarina	Florianópolis	Cfa	1819,88	151,66	4,98	6,76	4,06	3,96	5,18	5,25	1,31	235,85%
Santa Catarina	Lages	Cfb	1861,16	155,10	5,09	5,66	4,26	5,09	5,36	5,47	0,92	235,72%
São Paulo	Franca	Cwb	1696,34	141,36	4,64	8,42	2,05	1,10	7,06	6,56	0,55	246,17%
São Paulo	São Paulo	Cfb	1618,64	134,89	4,43	8,09	2,61	1,88	5,20	5,88	0,80	264,46%
Sergipe	Itabaianinha	As	1057,20	88,10	2,89	2,05	5,26	3,12	1,15	4,72	0,94	278,75%
Sergipe	Propriá	As	756,56	63,05	2,07	1,26	3,22	2,69	1,11	3,65	0,85	282,52%
Tocantins	Araguaína	Aw	1543,42	128,62	4,23	9,06	2,74	0,61	4,57	6,48	0,64	258,46%
Tocantins	Palmas	Aw	1558,08	129,84	4,27	7,93	2,74	0,48	5,97	7,01	0,19	253,76%
Distrito Federal	Brasília	Aw	1435,44	119,62	3,93	6,83	1,87	0,42	6,63	6,83	0,41	257,49%
Campos das Vertentes	São João Del Rei	Cwb	1378,08	114,84	3,77	6,18	1,21	0,99	6,73	6,01	0,67	274,66%
Central Mineira	Abaeté	Aw	933,62	77,80	2,56	4,14	0,91	0,54	4,64	4,45	0,53	318,78%
Jequitinhonha	Araçuaí	As	590,42	49,20	1,62	2,91	0,29	0,11	3,17	4,68	0,31	434,12%

Em que: Classificação Köppen: Classificação Climática segundo Alvares et al. (2013), onde: Af: Clima tropical úmido sem estação seca, Am: Clima tropical de monção, As: Clima tropical úmido com verão seco, Aw: Clima tropical úmido com inverno seco, BSh: Clima seco semiárido de baixa latitude e altitude, Cfa: clima subtropical úmido sem estação seca com verão quente, Cfb: clima subtropical úmido com verão temperado, Cwa: clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente, Cwb: clima subtropical úmido com inverno seco e verão ameno;  $P_{A,m}$ : Precipitação Anual Média;  $P_{M,m}$ : Precipitação Anual Média;  $P_{D,m}$ : Precipitação Diária Média;  $P_{D1^\circ,m}$ : Precipitação Média Diária para o primeiro trimestre;  $P_{D2^\circ,m}$ : Precipitação Média Diária para o segundo trimestre;  $P_{D3^\circ,m}$ : Precipitação Média Diária para o terceiro trimestre;  $P_{D4^\circ,m}$ : Precipitação Média Diária

para o quarto trimestre;  $P_{d,ch}$ : Precipitação Diária Média do Período Chuvoso;  $P_{d,se}$ : Precipitação Diária Média do Período de Estiagem; e CV: Coeficiente de Variação da Precipitação Diária. Fonte: Do autor (2023).

### 2.3. Simulação para dimensionamento do reservatório

A análise foi estabelecida com quatro tipos diferentes de demandas a fim de comparar a influência da variabilidade espacial sobre o dimensionamento do sistema de aproveitamento de águas pluviais (SAAP). Assim, foram definidos como critérios: demanda diária de água potável de 100, 150, 200 e 300 litros *per capita*; edificação residencial ocupada por três moradores; área de captação da água pluvial de 100 m<sup>2</sup>; coeficiente de escoamento superficial direto da cobertura (C) de 0,80; lâmina de descarte de 1 mm; e porcentagem de substituição de água potável por água pluvial de 25, 35, 45 e 55%.

Dessa forma, foram obtidas 16 configurações diferentes que se diz respeito a demanda diária de água pluvial total, sendo elas: 75, 105, 112,5, 135, 150, 157,5, 165, 202,5, 210, 225, 247,5, 270, 315, 330, 405 e 495 litros. A partir da metodologia comportamental descrita por Jenkins et al. (1978), a simulação para dimensionamento dos reservatórios para armazenamento de águas pluviais foi realizada.

Para as simulações, foram utilizadas séries históricas de precipitação, onde os dados apresentam uma sequência de 5 anos ininterruptas. Os algoritmos *Yield After Spill* (YAS) e *Yield Before Spill* (YBS) foram utilizados para obter o potencial de captação de água pluvial para uso não potável e os volumes máximo e ótimo do reservatório para cada um dos municípios selecionados para este trabalho. Para melhor definir, o volume máximo é aquele onde a economia de água é máxima no sistema e o ótimo é aquele que o incremento do volume não gera ganho proporcional na economia de água.

O volume captado foi calculado pela Equação 1. Para o YAS, a Equação 2 e 3 descrevem seu comportamento para o cálculo do volume do reservatório. Já para o YBS, a Equação 4 e 5 (JENKINS et al., 1978), enquanto o descarte de água pela Equação 6 (SAMPAIO; ALVES, 2017).

$$Q_t = (P_t \times C \times A) - DT_t \quad (1)$$

$$Y_t = \min \left\{ \begin{array}{l} D_t \\ V_{t-1} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$V_t = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{t-1} + Q_t - Y_t \\ S - Y_t \end{array} \right. \quad (3)$$

$$Y_t = \min \left\{ \begin{array}{l} D_t \\ V_{t-1} + Q_t \end{array} \right. \quad (4)$$

$$V_t = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{t-1} + Q_t - Y_t \\ S \end{array} \right. \quad (5)$$

$$DR_t = \max \left\{ \begin{array}{l} \text{zero} \\ V_{t-1} + Q_t - Y_t - V_{\text{máx}} \end{array} \right. \quad (6)$$

Sendo  $Q_t$  o volume de água pluvial captada no intervalo de tempo  $t$  ( $m^3$ );  $P_t$  a precipitação no tempo  $t$  ( $m$ );  $C$  o coeficiente de escoamento superficial direto (adimensional);  $A$  é a área da superfície de coleta de água da chuva ( $m^2$ );  $DT_t$  o Descarte de água para limpeza “*First-flush*” no tempo  $t$  ( $m^3$ ), caso tenha ocorrido precipitação em um dos três dias anteriores, seu valor é igual a zero;  $Y_t$  a água para suprir a demanda no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $D_t$  a demanda no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $V_t$  o Volume útil no reservatório no tempo  $t$  ( $m^3$ );  $DR_t$  o Volume de água descartado do reservatório no tempo  $t$  ( $m^3$ ); e  $S$  a Capacidade máxima do reservatório ( $m^3$ ).

O coeficiente de eficiência de economia de água (Equação 7) e confiabilidade plena (Equação 8) foram definidas por Jenkins et al. (1978), sendo dois indicadores de suprimento da demanda da edificação, com o objetivo de analisar a viabilidade técnica do dimensionamento.

$$E_{\text{eco}} = \frac{\sum Y_t}{\sum D_t} \quad (7)$$

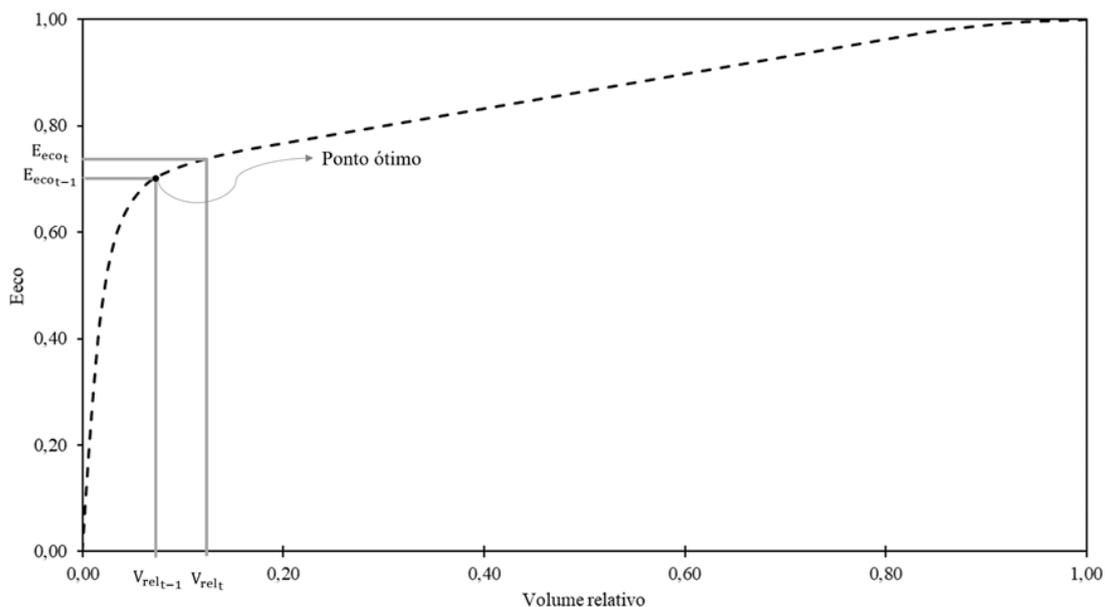
$$C_{\text{onf}} = \left( \frac{N_D}{N} \right) \times 100\% \quad (8)$$

Sendo,  $N$  o número de dias da série;  $N_D$  o número de dias em que a demanda foi suprida de forma total; o  $C_{\text{onf}}$  a confiabilidade plena e  $E_{\text{eco}}$  o coeficiente de economia de água.

Foi utilizado um software de planilha eletrônica para a aplicação das equações apresentadas acima com o objetivo de calcular o volume máximo e ótimo para o dimensionamento do reservatório para cada um dos algoritmos, além de também ser calculado o coeficiente de economia de água e sua confiabilidade plena.

O método de solução numérica por meio de iterações foi responsável para o encontro dos valores de volume máximo. Já para o volume ótimo foi utilizado o método do critério de parada. Os dois casos esquematizados na Figura 7.

Figura 7 – Esquema representativo demonstrando os pontos referentes ao volume ótimo e volume máximo, sendo o volume ótimo no ponto ótimo e o volume máximo no ponto mais alto.



Fonte: Dos autores (2023).

A partir do volume máximo, foi possível calcular o critério de parada para determinação do volume ótimo para dimensionamento do reservatório, sendo utilizadas as Equação 9 e 10 com a meta de suprir o critério apresentado na Equação 11.

$$V_{rel,t} = \frac{V_t}{V_{máx}} \quad (9)$$

$$\frac{E_{eco,t} - E_{eco,t-1}}{V_{rel,t} - V_{rel,t-1}} \quad (10)$$

$$\frac{E_{eco,t} - E_{eco,t-1}}{V_{rel,t} - V_{rel,t-1}} \leq \tan 45^\circ, V_{ót.} = V_{t-1} \quad (11)$$

Sendo  $V_{rel_t}$  o volume relativo no tempo  $t$  (grandeza adimensional);  $V_{rel_{t-1}}$  o volume relativo no tempo  $t-1$  (adimensional);  $E_{eco_t}$  o coeficiente de eficiência econômica no tempo  $t$  (adimensional); e  $E_{eco_{t-1}}$  o coeficiente de eficiência econômica no tempo  $t-1$  (adimensional).

A Equação 9 calculou o volume relativo, de maneira que os volumes ótimos dimensionados apresentassem valores dentro de um intervalo entre 0 e 1, assim como acontece para a eficiência de economia de água. Já a partir da Equação 11, tem-se que a variação do volume não traz o mesmo ganho proporcional para os valores de eficiência. Assim, pela Equação 10, obtém-se a tangente formada pelo ângulo entre os pontos “ $t$ ” e “ $t-1$ ” no gráfico, sendo que, quando esse valor apresenta valor imediatamente abaixo de 1, significa que o critério de parada foi atingido, encontrando o valor do volume ótimo.

### **2.3.1. Exclusão de municípios**

A partir dos volumes máximos e ótimos obtidos para cada um dos municípios, levando em conta suas respectivas demandas e algoritmo (YAS e YBS), foi visto que alguns municípios não apresentaram valores numéricos para altas demandas, pois não era atingido um critério de parada. Por conta disso, tais municípios foram removidos da análise de agrupamentos hierárquicos para que fosse possível ajustar os modelos matemáticos para todos os valores de demanda simulados.

Estes municípios foram: Vitória Da Conquista (BA), Petrolina (PE) e Surubim (PE), todos localizados na Região Nordeste e não apresentaram valores quando houve a tentativa de dimensionamento dos volumes máximos e ótimos dos reservatórios para demandas de 0,405 e 0,495 m<sup>3</sup>/dia, para o algoritmo YBS.

### **2.4. Agrupamento dos municípios**

Foi feita a padronização das variáveis relativas à precipitação em cada município em escores  $Z$ , utilizando a Equação 12, na qual foi definido média nula e variância unitária, com o objetivo de minimizar quaisquer interferências que as grandezas das variáveis poderiam causar nas análises (HAIR JÚNIOR et al., 2009; SINGH et al., 2004; VICINI et al., 2018).

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (12)$$

Sendo  $Z_{ij}$  a variável padronizada de  $X_{ij}$ ;  $X_{ij}$  a variável de atributo  $j$  e o objeto  $i$ ;  $\bar{X}_j$  a média aritmética da variável  $j$ ; e  $S_j$  o desvio padrão amostral da variável  $j$ .

Para a Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH), foram agrupados 53 municípios (casos) pela definição de 22 variáveis relativas a estes. O agrupamento foi realizado por meio do cálculo da Distância Euclidiana, como mostra a Equação 13, entre os indivíduos  $i$  e  $i'$  (HAIR JÚNIOR et al., 2009).

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum (Z_{ij} - Z_{i'j})^2} \quad (13)$$

Sendo  $d_{ii'}$  a distância euclidiana entre as variáveis padronizadas de  $Z_{ij}$  e  $Z_{i'j}$ .

Já para o processo aglomerativo de ligação foi utilizado o método Ward (WARD, 1963). Para a formação de grupos foi feito um corte no qual apresentassem maior similaridade interna, pois com o aumento da distância de ligação, a semelhança tende a diminuir e distância para a ocorrência de novos grupos aumenta. Esta análise foi realizada com o auxílio do pacote para Excel XLStat®, em sua versão de teste (ADDINSOFT, 2022).

#### **2.4.1. Formação dos subgrupos**

A partir da definição dos agrupamentos, estes foram refinados, sendo definidos subgrupos, em função da verificação de semelhança visual na distribuição de pontos dos valores de volume calculado em função da demanda por recurso hídrico não potável.

Assim, para o algoritmo YAS, para os modelos para estimativa do Volume Ótimo, foram utilizados subgrupos:

C1A: AC - Rio Branco; AC - Tarauacá; AM - Lábrea; AM - Manaus; AP - Calçoene; AP - Macapá; MS - Ponta Porã; MT - Comodoro; PA - Belém; RO - Alta Floresta d'Oeste; RR - Rorainópolis

C1B: PR - Maringá; RS - Porto Alegre; RS - Santa Maria; SC - Florianópolis; SC - Lages

C2A: AL - Jacuípe; MG - Patos de Minas; PB - João Pessoa; PI - Piri-piri; RJ - Rio de Janeiro; RN - Natal; SP - Franca; TO - Araguaína; TO - Palmas

C2B: BA - Salvador; CE - Fortaleza

C2C: DF - Brasília; ES - Muniz Freire; GO - Jataí; MA - Chapadinha; MG - Lavras; PI - Floriano; PR - Curitiba; SP - São Paulo

C2D: MA - São Luís; MT - Sinop; RO - Cabixi; RR - Boa Vista

C2E: ES - Vitória

C2F: RJ - Itaperuna; SE - Itabaianinha

C2G: GO - Formosa; MS - Campo Grande; PA - Conceição do Araguaia

C3A: AL - Palmeira dos Índios; CE - Sobral; PB - São Gonçalo; SE - Propriá

C3B: BA - Vitória da Conquista; PE - Surubim; RN - Apodi

C3C: PE – Petrolina

Para o YAS – Volume Máximo, teve-se:

C1A: AC - Rio Branco; AC - Tarauacá; AM - Lábrea; AM - Manaus; AP - Calçoene; AP - Macapá; CE - Fortaleza; MA - São Luís; MT - Comodoro; MT - Sinop; PA - Belém; PR - Maringá; RO - Alta Floresta d'Oeste; RR - Rorainópolis; SC - Lages

C1B: AL - Jacuípe; BA - Salvador; MG - Patos de Minas; MS - Ponta Porã; PB - João Pessoa; PI - Piri-piri; RJ - Rio de Janeiro; RN - Natal; RO - Cabixi; RS - Porto Alegre; RS - Santa Maria; SC - Florianópolis; SP - Franca; TO - Araguaína; TO - Palmas

C1C: ES - Muniz Freire; GO - Jataí; PR - Curitiba; SP - São Paulo

C1D: MA - Chapadinha; MG - Lavras; MS - Campo Grande; PA - Conceição do Araguaia

C1E: DF - Brasília; ES - Vitória; GO - Formosa; RJ - Itaperuna; SE - Itabaianinha

C2A: RR - Boa Vista

C2B: PI - Floriano

C2C: AL - Palmeira dos Índios; CE - Sobral; PB - São Gonçalo; SE - Propriá

C2D: BA - Vitória da Conquista; RN - Apodi

C2E: PE - Surubim

C2F: PE - Petrolina

Para o caso do YBS – Volume Ótimo; têm-se:

C1A: AC - Rio Branco; AC - Tarauacá; AM - Lábrea; AM - Manaus; AP - Calçoene; AP - Macapá; MT - Comodoro; PA - Belém; RO - Alta Floresta d'Oeste; RR - Rorainópolis

C1B: AL - Jacuípe; MS - Ponta Porã; PB - João Pessoa; PR - Maringá; RN - Natal; RS - Porto Alegre; RS - Santa Maria; SC - Florianópolis; SC - Lages

C1C: PR - Curitiba; SP - São Paulo

C1D: BA - Salvador; MS - Campo Grande

C1E: ES - Vitória

C2A: MA - São Luís; RO - Cabixi

C2B: MG - Patos de Minas; MT - Sinop; PI - Piripiri; RJ - Rio de Janeiro; SP - Franca; TO - Araguaína; TO - Palmas

C2C: CE - Fortaleza; DF - Brasília; GO - Jataí; MA - Chapadinha; RR - Boa Vista

C2D: ES - Muniz Freire; MG - Lavras; PA - Conceição do Araguaia

C2E: GO - Formosa; PI - Floriano

C2F: PB - São Gonçalo; RJ - Itaperuna; SE - Itabaianinha

C2G: AL - Palmeira dos Índios; CE - Sobral

C2H: SE - Propriá

C2I: RN – Apodi

Por fim, têm-se os subgrupos do YBS – Volume Máximo:

C1A: AC - Rio Branco; AC - Tarauacá; AM - Lábrea; AM - Manaus; AP - Calçoene; AP - Macapá; MT - Comodoro; PA - Belém; PR - Maringá; RO - Alta Floresta d'Oeste; RR – Rorainópolis

C1B: MS - Ponta Porã; RS - Porto Alegre; RS - Santa Maria; SC - Florianópolis; SC – Lages

C1C: PR – Curitiba

C2A: AL - Jacuípe; BA - Salvador; MG - Patos de Minas; PB - João Pessoa; PI - Piripiri; RO - Cabixi; SP - Franca; TO - Araguaína; TO – Palmas

C2B: CE - Fortaleza; MA - São Luís; MT – Sinop

C2C: DF - Brasília; MA - Chapadinha; MG - Lavras; MS - Campo Grande; PA - Conceição do Araguaia

C2D: ES - Vitória; GO – Formosa

C2E: GO - Jataí; SP - São Paulo

C2F: RN – Apodi

C3A: AL - Palmeira dos Índios; CE - Sobral; PB - São Gonçalo; SE - Propriá

C3B: ES - Muniz Freire

C3C: PI – Floriano

C3D: RJ - Itaperuna; SE – Itabaianinha

C3E: RJ - Rio de Janeiro

C4A: RN - Natal; RR - Boa Vista

## 2.5. Definição dos modelos a serem ajustados

Com os valores das variáveis estatísticas relativas à precipitação (Tabela 2) e de posse dos volumes calculados para os reservatórios, considerando ambos os algoritmos, foram ajustadas equações empíricas, dentro de cada grupo formado pela AAH.

As variáveis independentes dos modelos testados foram as estatísticas relativas à precipitação e as demandas simuladas, com o objetivo de estimar o volume ótimo e

máximo para cada algoritmo comportamental O ajuste dos parâmetros dos modelos empíricos foi realizado por meio do pacote Solver do Excel, método GRG não linear.

Os modelos selecionados para serem ajustados, de acordo com os comportamentos das curvas de comportamento de volume ótimo por demanda e volume máximo por demanda, são apresentados na Tabela 3 e Tabela 4, de acordo com o apresentado no estudo de Correa (2021).

Tabela 3 – Modelos a serem ajustados para os volumes ótimos dos municípios estudados para as duas regiões de comportamento, sendo  $\alpha$  e  $\beta$  os parâmetros ajustáveis.

Variável	1ª Região de comportamento	2ª Região de comportamento
Precipitação média diária ( $P_d$ )	$V = \alpha \cdot P_d \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_d \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média mensal ( $P_m$ )	$V = \alpha \cdot P_m \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_m \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média anual ( $P_a$ )	$V = \alpha \cdot P_a \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 1º trimestre ( $P_{d,1^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,1^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,1^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 2º trimestre ( $P_{d,2^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,2^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,2^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 3º trimestre ( $P_{d,3^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,3^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,3^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 4º trimestre ( $P_{d,4^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,4^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,4^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do período chuvoso ( $P_{d,ch}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do período de estiagem ( $P_{d,se}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,se} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,se} \cdot A} \right)^\beta$
Coefficiente de variação da precipitação média diária ( $CV$ )	$V = \alpha \cdot CV \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot CV \cdot D_d^\beta$

Fonte: CORREA (2021).

Tabela 4 – Modelos a serem ajustados para os volumes máximos dos municípios estudados para as duas regiões de comportamento, sendo  $\alpha$  e  $\beta$  os parâmetros ajustáveis.

Variável	1ª Região de comportamento	2ª Região de comportamento
Precipitação média diária ( $P_d$ )	$V = \alpha \cdot P_d \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_d \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média mensal ( $P_m$ )	$V = \alpha \cdot P_m \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_m \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média anual ( $P_a$ )	$V = \alpha \cdot P_a \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 1º trimestre ( $P_{d,1^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,1^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,1^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 2º trimestre ( $P_{d,2^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,2^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,2^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 3º trimestre ( $P_{d,3^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,3^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,3^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do 4º trimestre ( $P_{d,4^\circ}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,4^\circ} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,4^\circ} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do período chuvoso ( $P_{d,ch}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^\beta$
Precipitação média diária do período de estiagem ( $P_{d,se}$ )	$V = \alpha \cdot P_{d,se} \cdot A \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,se} \cdot A} \right)^\beta$
Coefficiente de variação da precipitação média diária ( $CV$ )	$V = \alpha \cdot CV \cdot e^{\beta \cdot D_d}$	$V = \alpha \cdot CV \cdot D_d^\beta$

Fonte: CORREA (2021).

Os modelos obtidos foram avaliados considerando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), dado pela Equação 14 e a raiz do erro quadrado médio (REQM), Equação 15, produzido pelos modelos em relação aos dados originais, conforme a Equação 5, sendo  $\alpha$  e  $\beta$  os parâmetros ajustáveis.

Além dos indicadores acima mencionados, os modelos também foram avaliados utilizando o Viés (B), conforme Equação 16.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (14)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (15)$$

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad (16)$$

Em que,  $\hat{y}_i$  é o valor estimado, pelos modelos ajustados;  $\bar{y}$  é a média das observações, isso é, os valores obtidos pelos métodos comportamentais e  $y_i$  o valor observado, e  $n$  o número total de pares de dados.

### 2.5.1. Separação das regiões de comportamento

Os subgrupos formados foram separados, visualmente, pela verificação de sua tendência de comportamento, levando em consideração seus pontos máximos de volume obtido em relação a uma determinada demanda, ou mesmo quando possuíam apenas comportamento ascendente.

Os subgrupos que apresentaram uma região ascendente e outra descendente foram analisados e, para a realização do ajuste dos modelos, separados em duas regiões de comportamento, em que o ponto de inflexão, que separava estas regiões, também foi definido por análise visual, buscando-se um valor que fosse um ponto de máximo comum de demanda a todos os municípios do subgrupo. Além disso, necessariamente, dever-se-ia ter, pelo menos, dois pares de valores em quaisquer regiões de comportamento.

Os subgrupos que apresentaram apenas uma única região de comportamento, foram: C1A e C2B, para o caso do YBS – Volume Ótimo; C1A e C2A para o YBS – Volume Máximo; C1A e C2F para o YAS – Volume Ótimo e; C1A, C2D e C3C para o caso do YAS – Volume Máximo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os melhores modelos obtidos para cada subgrupo em função da análise conjunta de  $R^2$  e REQM, são mostrados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8.

Tabela 5 – Melhores modelos práticos para estimativa do volume do reservatório de águas pluviais para aproveitamento não-potável, ao se considerar o algoritmo YBS de dimensionamento e o volume máximo do reservatório (continua)

Grupo	Subgrupo	1ª Região	$R^2$	REQM (m <sup>3</sup> )	Viés (m <sup>3</sup> )	Limite da 1ª Região (m <sup>3</sup> /dia)	2ª Região	$R^2$	REQM (m <sup>3</sup> )	Viés (m <sup>3</sup> )
C1	C1A	$V = 3,458 \cdot CV \cdot e^{4,738 \cdot D_d}$	0,771	8,647	-0,283	-	-	-	-	-
	C1B	$V = 0,007 \cdot P_{d,1^{\circ}} \cdot A \cdot e^{5,520 \cdot D_d}$	0,849	3,777	1,112	0,400	$V = 100,790 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,3^{\circ}} \cdot A}\right)^{0,135}$	0,325	15,316	0,284
	C1C	$V = 1,346 \cdot CV \cdot e^{8,107 \cdot D_d}$	0,974	1,712	0,239	0,320	$V = 39,898 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,009}$	0,936	7,307	-0,010
C2	C2A	$V = 3,303 \cdot CV \cdot e^{5,865 \cdot D_d}$	0,869	5,582	0,142	0,400	$V = 100,516 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,4^{\circ}} \cdot A}\right)^{0,073}$	0,229	11,850	0,151
	C2B	$V = 0,021 \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{3,300 \cdot D_d}$	0,862	7,600	0,572	-	-	-	-	-
	C2C	$V = 0,012 \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{6,759 \cdot D_d}$	0,931	4,223	-0,116	0,320	$V = 100,452 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,3^{\circ}} \cdot A}\right)^{0,136}$	0,139	15,151	0,170
	C2D	$V = 2,669 \cdot 10^{-5} \cdot P_a \cdot A \cdot e^{12,302 \cdot D_d}$	0,873	6,927	-0,132	0,260	$V = 100,578 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,1^{\circ}} \cdot A}\right)^{0,086}$	0,187	15,828	0,191
	C2E	$V = 0,014 \cdot P_{d,4^{\circ}} \cdot A \cdot e^{6,035 \cdot D_d}$	0,935	3,439	0,144	0,320	$V = 99,701 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,057}$	0,960	11,345	-0,106
	C2F	$V = 1,285 \cdot 10^{-4} \cdot P_a \cdot A \cdot e^{14,060 \cdot D_d}$	1,000	$1,66 \cdot 10^{-10}$	$-3,17 \cdot 10^{-11}$	0,110	$V = 99,207 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,124}$	0,927	5,186	-0,262
C3	C3A	$V = 0,035 \cdot P_d \cdot A \cdot e^{9,443 \cdot D_d}$	0,637	5,776	0,123	0,200	$V = 99,211 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,se} \cdot A}\right)^{0,232}$	0,011	11,053	-0,262

Tabela 5 – Melhores modelos práticos para estimativa do volume do reservatório de águas pluviais para aproveitamento não-potável, ao se considerar o algoritmo YBS de dimensionamento e o volume máximo do reservatório (conclusão)

C3B	$V = 0,00009 \cdot P_a \cdot A \cdot e^{4,756 \cdot D_d}$	0,940	2,768	0,120	0,400	$V = 99,866 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,076}$	1,000	6,473	-0,049	
C3C	$V = 0,068 \cdot P_{d,2^{\circ}} \cdot A \cdot e^{7,652 \cdot D_d}$	0,964	1,763	0,079	0,205	$V = 99,483 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,078}$	0,851	9,331	-0,189	
C3D	$V = 0,018 \cdot P_d \cdot A \cdot e^{8,596 \cdot D_d}$	0,965	2,066	0,149	0,260	$V = 99,496 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,104}$	0,936	8,254	-0,178	
C3E	$V = 1,960 \cdot CV \cdot e^{5,796 \cdot D_d}$	0,867	4,265	0,337	0,400	$V = 99,938 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,063}$	1,000	3,514	-0,022	
C4	C4A	$V = 0,020 \cdot P_{d,3^{\circ}} \cdot A \cdot e^{5,744 \cdot D_d}$	0,977	2,716	0,421	0,400	$V = 99,904 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,054}$	0,436	5,386	-0,033

Fonte: Do autor (2023)

Na Tabela 5 pode-se observar os valores mais adequados dos modelos ajustados para Volume Máximo obtido por meio do algoritmo YBS, definidos tomando como base o menor valor encontrado da REQ. Vê-se que, em geral, para a primeira região de comportamento, que os valores de  $R^2$  mostraram-se mais satisfatórios, próximos de 1.

Ainda, para o caso da primeira região de comportamento, nota-se valores negativos e positivos de Viés, onde valores negativos significam uma subestimação e valores positivos, uma superestimação dos dados simulados pelo modelo, em relação aos observados. No único caso em que o  $R^2$  apresenta o valor 1, se teve um valor muito pequeno de Viés (Subgrupo C2F) e isso indica uma qualidade com valores mais adequados, em relação aos indicadores estatísticos, para o ajuste, ou seja, os valores obtidos pelo modelo se aproximaram muito do que foi observado, justamente por ter apresentado um valor de  $R^2$  próximo a 1. Para a maioria dos outros modelos os valores de Viés foram positivos, ou seja, estes superestimam os volumes máximos dos reservatórios para o caso do YBS.

Para a segunda região de comportamento, na maioria dos casos, os valores da REQM foram maiores quando comparados com os valores da primeira região de comportamento. Além disso, os valores de  $R^2$  também foram menores, tendo-se, então, uma qualidade menor dos ajustes

Na Tabela 5, também, pode-se notar que, predominantemente, o limite da primeira região de comportamento esteve entre 0,400 e 0,320  $m^3/dia$ , havendo 5 limites de 0,400  $m^3/dia$  e 3 de 0,320  $m^3/dia$ .

Tabela 6 – Melhores modelos práticos para estimativa do volume do reservatório de águas pluviais para aproveitamento não-potável, ao se considerar o algoritmo YBS de dimensionamento e o volume ótimo do reservatório.

Grupo	Subgrupo	1ª Região	$R^2$	REQM ( $m^3$ )	Viés ( $m^3$ )	Limite da 1ª Região ( $m^3/dia$ )	2ª Região	$R^2$	REQM ( $m^3$ )	Viés ( $m^3$ )
	C1A	$V = 0,318 \cdot CV \cdot e^{4,050 \cdot D_d}$	0,810	0,491	0,009	-	-	-	-	-
	C1B	$V = 0,244 \cdot CV \cdot e^{5,842 \cdot D_d}$	0,835	0,454	0,014	0,400	$V = 99,636 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,3e} \cdot A} \right)^{0,433}$	0,002	1,726	-0,061
C1	C1C	$V = 0,256 \cdot CV \cdot e^{6,736 \cdot D_d}$	0,965	0,244	0,025	0,320	$V = 99,697 \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^{0,242}$	0,934	1,066	-0,042
	C1D	$V = 0,289 \cdot CV \cdot e^{6,836 \cdot D_d}$	0,948	0,334	0,016	0,320	$V = 99,616 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,4e} \cdot A} \right)^{0,460}$	0,243	1,305	-0,061
	C1E	$V = 0,080 \cdot CV \cdot e^{14,403 \cdot D_d}$	0,995	0,192	-0,031	0,260	$V = 99,400 \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^{0,221}$	0,895	2,245	-0,101
	C2A	$V = 0,371 \cdot CV \cdot e^{3,250 \cdot D_d}$	0,936	0,246	0,017	-	-	-	-	-
	C2B	$V = 0,357 \cdot CV \cdot e^{4,184 \cdot D_d}$	0,759	0,471	0,011	0,400	$V = 99,498 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,2e} \cdot A} \right)^{0,522}$	0,080	0,838	-0,063
	C2C	$V = 0,387 \cdot CV \cdot e^{4,415 \cdot D_d}$	0,850	0,342	0,007	0,320	$V = 99,605 \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^{0,257}$	0,621	1,012	-0,049
C2	C2D	$V = 0,366 \cdot CV \cdot e^{4,902 \cdot D_d}$	0,888	0,371	0,016	0,320	$V = 99,595 \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^{0,256}$	0,714	1,019	-0,051
	C2E	$V = 0,047 \cdot P_{d,3e} \cdot A \cdot e^{5,762 \cdot D_d}$	0,884	0,315	0,008	0,260	$V = 99,313 \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^{0,277}$	0,694	1,209	-0,073
	C2F	$V = 0,402 \cdot CV \cdot e^{4,079 \cdot D_d}$	0,546	0,557	-0,063	0,260	$V = 99,183 \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^{0,306}$	0,772	0,969	-0,068

C2G	$V = 0,019 \cdot P_{d,se} \cdot A \cdot e^{9,193 \cdot D_d}$	0,912	0,423	-0,156	0,160	$V = 98,937 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,299}$	0,594	1,101	-0,091
C2H	$V = 0,089 \cdot CV \cdot e^{17,241 \cdot D_d}$	0,922	0,288	-0,017	0,160	$V = 98,007 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,323}$	0,901	1,410	-0,142
C2I	$V = 0,179 \cdot CV \cdot e^{7,675 \cdot D_d}$	1,000	$3,915 \cdot 10^{-5}$	$-3,91 \cdot 10^{-5}$	0,110	$V = 97,932 \cdot \left(\frac{D_d}{P_a \cdot A}\right)^{0,356}$	0,922	0,781	-0,113

Fonte: Do autor (2023)

Quanto à Tabela 6, em geral, pôde-se analisar que os modelos apresentaram melhor qualidade quando para simular o volume ótimo para o algoritmo YBS, em relação ao volume máximo. Para os modelos determinados para o volume ótimo e algoritmo YBS (Tabela 6), os valores de Viés foram menores quando comparados com os obtidos para os modelos de volume máximo pelo mesmo algoritmo (Tabela 5).

Para os modelos referentes ao volume ótimo, para YBS, os limites da primeira região de comportamento foram similares com os determinados para o volume máximo, para YBS (Tabela 5). Valores de 0,400 e 0,320 m<sup>3</sup>/dia foram os que predominaram, sendo 2 limites para o primeiro caso e 4 para o último.

Tabela 7 – Melhores modelos práticos para estimativa do volume do reservatório de águas pluviais para aproveitamento não-potável, ao se considerar o algoritmo YAS de dimensionamento e o volume máximo do reservatório.

Grupo	Subgrupo	1ª Região	R <sup>2</sup>	REQM (m <sup>3</sup> )	Viés (m <sup>3</sup> )	Limite da 1ª Região (m <sup>3</sup> /dia)	2ª Região	R <sup>2</sup>	REQM (m <sup>3</sup> )	Viés (m <sup>3</sup> )
	C1A	$V = 4,225 \cdot CV \cdot e^{4,206 \cdot D_d}$	0,711	10,517	0,138	-	-	-	-	-
	C1B	$V = 0,011 \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{5,986 \cdot D_d}$	0,745	7,878	0,408	0,400	$V = 99,746 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,se} \cdot A}\right)^{0,070}$	0,677	3,464	0,083
C1	C1C	$V = 0,011 \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{5,986 \cdot D_d}$	0,881	5,348	-2,300	0,320	$V = 50,066 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,3^a} \cdot A}\right)^{0,023}$	0,013	10,233	0,007
	C1D	$V = 0,012 \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{6,999 \cdot D_d}$	0,935	4,184	-0,164	0,320	$V = 101,176 \cdot \left(\frac{D_d}{P_{d,3^a} \cdot A}\right)^{0,126}$	0,310	15,315	0,406

C2	C1E	$V = 0,015 \cdot P_d \cdot A \cdot e^{9,700 \cdot D_d}$	0,814	6,542	-0,074	0,260	$V = 100,204 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,1^e} \cdot A} \right)^{0,073}$	0,116	7,690	16,391
	C2A	$V = 0,036 \cdot P_d \cdot A \cdot e^{5,791 \cdot D_d}$	0,981	2,233	0,167	0,320	$V = 99,755 \cdot \left( \frac{D_d}{P_a \cdot A} \right)^{0,043}$	0,878	11,540	-0,077
	C2B	$V = 2,970 \cdot CV \cdot e^{7,647 \cdot D_d}$	0,964	1,773	0,079	0,205	$V = 49,600 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,037}$	0,843	8,768	-0,083
	C2C	$V = 0,056 \cdot P_d \cdot A \cdot e^{6,012 \cdot D_d}$	0,622	6,519	0,188	0,215	$V = 50,578 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,3^e} \cdot A} \right)^{0,070}$	0,216	5,344	5,976
	C2D	$V = 0,035 \cdot P_{d,1^e} \cdot A \cdot e^{8,581 \cdot D_d}$	0,816	2,762	-0,041	0,140	$V = 49,352 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,125}$	0,973	3,663	-1,402
	C2E	$V = 2,188 \cdot CV \cdot e^{11,881 \cdot D_d}$	1,000	0,00005	$-3,38 \cdot 10^{-5}$	0,110	$V = 49,211 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,2^e} \cdot A} \right)^{0,209}$	0,791	3,979	0,774
	C2F	$V = 0,006 \cdot P_m \cdot A \cdot e^{0,864 \cdot D_d}$	0,973	3,984	-0,400	-	-	-	-	-

Fonte: Do autor (2023)

Destaca-se, para os modelos ajustados para volume máximo de reservatório, obtido por meio do algoritmo YAS (Tabela 7) o subgrupo C2E que apresentou valores satisfatórios, quanto aos indicadores estatísticos de ajuste, sendo o  $R^2$  é igual a 1, REQM igual a  $0,00005 \text{ m}^3$  e o Viés, quase nulo. Já para estes modelos (Tabela 7), os limites da primeira região de comportamento tiveram o valor de  $0,320 \text{ m}^3/\text{dia}$  sendo o de maior ocorrência, tendo 3 subgrupos apresentando tal limite dentre os 9 subgrupos.

Tabela 8 – Melhores modelos práticos para estimativa do volume do reservatório de águas pluviais para aproveitamento não-potável, ao se considerar o algoritmo YAS de dimensionamento e o volume ótimo do reservatório.

Grupo	Subgrupo	1ª Região	R <sup>2</sup>	REQM (m <sup>3</sup> )	Viés (m <sup>3</sup> )	Limite da 1ª Região	2ª Região	R <sup>2</sup>	REQM (m <sup>3</sup> )	Viés (m <sup>3</sup> )
C1	C1A	$V = 0,420 \cdot CV \cdot e^{3,962 \cdot D_d}$	0,842	0,571	0,011	-	-	-	-	-
	C1B	$V = 0,276 \cdot CV \cdot e^{6,072 \cdot D_d}$	0,837	0,536	0,012	0,400	$V = 100,017 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,3^o} \cdot A} \right)^{0,407}$	0,065	1,568	0,001
	C2A	$V = 0,394 \cdot CV \cdot e^{4,522 \cdot D_d}$	0,835	0,461	0,008	0,400	$V = 99,772 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,1^o} \cdot A} \right)^{0,417}$	0,151	1,231	-0,036
	C2B	$V = 0,001 \cdot P_{d,2^o} \cdot A \cdot e^{6,825 \cdot D_d}$	0,974	0,237	0,003	0,320	$V = 10,002 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,056}$	0,018	1,109	0,0005
C2	C2C	$V = 0,469 \cdot CV \cdot e^{4,174 \cdot D_d}$	0,716	0,607	0,006	0,320	$V = 9,958 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,109}$	0,275	1,131	-0,015
	C2D	$V = 0,521 \cdot CV \cdot e^{2,827 \cdot D_d}$	0,799	0,563	0,030	-	-	-	-	-
	C2E	$V = 0,103 \cdot CV \cdot e^{13,556 \cdot D_d}$	0,994	0,218	-0,032	0,260	$V = 9,967 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,030}$	0,959	1,237	0,704
	C2F	$V = 0,426 \cdot CV \cdot e^{5,320 \cdot D_d}$	0,783	0,456	0,001	0,260	$V = 9,929 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,163}$	0,767	0,805	-0,026
	C2G	$V = 0,371 \cdot CV \cdot e^{5,808 \cdot D_d}$	0,802	0,640	0,010	0,320	$V = 9,841 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,se} \cdot A} \right)^{0,172}$	0,354	1,347	-0,057
	C3A	$V = 0,218 \cdot CV \cdot e^{11,180 \cdot D_d}$	0,311	0,959	-0,107	0,155	$V = 9,842 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,163}$	0,423	1,123	-0,056
C3	C3B	$V = 0,002 \cdot P_{d,ch} \cdot A \cdot e^{13,413 \cdot D_d}$	0,199	0,561	-0,077	0,110	$V = 9,677 \cdot \left( \frac{D_d}{P_{d,ch} \cdot A} \right)^{0,237}$	0,677	1,042	-0,096
	C3C	$V = 0,193 \cdot CV \cdot e^{0,0001 \cdot D_d}$	0,791	0,547	-0,60	-	-	-	-	-

Fonte: Do autor (2023)

Na Tabela 8, os modelos da segunda região de comportamento apresentaram uma menor qualidade de ajuste, em relação à primeira região de comportamento desses mesmos subgrupos e quanto às segundas regiões dos outros agrupamentos apresentados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8. Os

valores de Viés foram predominantemente negativos e o valores  $R^2$  foram menores que 0,5 para mais de 50% dos subgrupos, enquanto para a primeira região de comportamento, os valores apresentaram serem mais adequados, quanto ao ajuste.

Para a Tabela 8, os limites da primeira região de comportamento foram semelhantes quando comparados ao mostrado nas Tabelas 5, 6 e 7, sendo o limite de 0,320 m<sup>3</sup>/dia foi o de maior predomínio, porém, em seguida, as demandas de 0,260 e 0,400 m<sup>3</sup>/dia tiveram duas ocorrências.

De maneira geral, uma possibilidade de se ter essa diferença, quanto ao valor de  $R^2$ , entre as duas regiões de comportamento dos modelos, tanto para volume máximo quanto ótimo, ao se considerar os algoritmos YAS e YBS (Tabelas 5 a 8), é quantidade de pares de dados observados. Na maioria das primeiras regiões de comportamento para cada subgrupo, a quantidade de dados era superior às suas respectivas segundas regiões de comportamento, sendo que, em muitos casos, a segunda região de comportamento só dispunha de 2 pares de dados.

Dos 52 subgrupos formados, 43 apresentam duas regiões de comportamento. Desses 43 subgrupos, 13 são divididos no valor de 0,320 m<sup>3</sup>/dia e 10 na demanda de 0,400 m<sup>3</sup>/dia. Desta forma, estes valores podem ser tomados como demandas indicativas gerais para uma maior viabilidade do uso de águas pluviais para fins não potáveis, já que nestes casos ter-se-ia uma maior substituição, menor consumo de água tratada e um menor volume de reservatório, que implica em um custo menor de implantação do sistema (FARIA; THEBALDI; MERLO, 2021).

Já os volumes máximos e mínimos obtidos para o reservatório de águas pluviais para uso não potável, considerando as diversas demandas simuladas, podem ser vistos na Tabela 9 (volume máximo – YBS), Tabela 10 (volume ótimo - YBS), Tabela 11 (volume máximo - YAS), e Tabela 12 (volume ótimo - YAS).

TABELA 9 – Melhor variável estatística relativa à precipitação auxiliar ao ajuste dos modelos práticos para estimativa do volume de reservatórios de águas pluviais para fins não potáveis e volumes máximos e mínimos obtidos para cada um dos subgrupos definidos para a análise de volume máximo dos reservatórios por meio do algoritmo YBS

Grupo	Subgrupo	Variável 1R	Variável 2R	Vmáx (m <sup>3</sup> )	Vmín (m <sup>3</sup> )
C1	C1A	CV	-	84.271	1.244
	C1B	P <sub>d,1º</sub>	P <sub>d,3º</sub>	79.373	1.350
	C1C	CV	P <sub>a</sub>	42.992	3.682
C2	C2A	CV	P <sub>d,4º</sub>	93.765	5.211
	C2B	P <sub>d,ch</sub>	-	86.964	9.105
	C2C	P <sub>d,ch</sub>	P <sub>d,3º</sub>	83.008	5.166
	C2D	P <sub>a</sub>	P <sub>d,1º</sub>	80.867	3.956
	C2E	P <sub>d,4º</sub>	P <sub>a</sub>	62.174	6.219
	C2F	P <sub>a</sub>	P <sub>a</sub>	27.576	14.975
C3	C3A	P <sub>d</sub>	P <sub>d,se</sub>	47.035	7.397
	C3B	P <sub>a</sub>	P <sub>a</sub>	47.676	9.224
	C3C	P <sub>d,2º</sub>	P <sub>a</sub>	46.384	14.636
	C3D	P <sub>d</sub>	P <sub>a</sub>	42.918	6.468
	C3E	CV	P <sub>a</sub>	48.776	4.596
C4	C4A	P <sub>d,3º</sub>	P <sub>a</sub>	72.994	7.057

Em que: Variável 1R - Variável relativa à precipitação (1ª região); Variável 2R - Variável relativa à precipitação (2ª região); Vmáx – volume máximo; Vmín – volume mínimo. Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar a Tabela 9, pode-se notar que a variável estatística de precipitação CV foi a que predominou nos melhores modelos relativos à primeira região de

comportamento, enquanto para a segunda região de comportamento, a variável relativa à precipitação  $P_a$  foi a que mais contribuiu a simular os volumes dos reservatórios.

TABELA 10 – Melhor variável estatística relativa à precipitação auxiliar ao ajuste dos modelos práticos para estimativa do volume de reservatórios de águas pluviais para fins não potáveis e volumes máximos e mínimos obtidos para cada um dos subgrupos definidos para a análise de volume ótimo dos reservatórios por meio do algoritmo YBS

Grupo	Subgrupo	Variável 1R	Variável 2R	Vmáx (m <sup>3</sup> )	Vmín (m <sup>3</sup> )
C1	C1A	CV	-	6.653	0.118
	C1B	CV	$P_{d,3^o}$	8.914	0.434
	C1C	CV	$P_a$	5.732	0.568
	C1D	CV	$P_{d,4^o}$	6.547	0.735
	C1E	CV	$P_a$	9.722	0.914
C2	C2A	CV	-	4.562	0.638
	C2B	CV	$P_{d,2^o}$	5.051	0.675
	C2C	CV	$P_a$	5.654	0.874
	C2D	CV	$P_a$	5.753	0.9
	C2E	$P_{d,3^o}$	$P_a$	4.844	0.975
	C2F	CV	$P_a$	4.014	0.878
	C2G	$P_{d,se}$	$P_a$	5.357	0.35
	C2H	CV	$P_a$	4.382	0.089
	C2I	CV	$P_a$	2.081	0.191

Em que: Variável 1R - Variável relativa à precipitação (1<sup>a</sup> região); Variável 2R - Variável relativa à precipitação (2<sup>a</sup> região); Vmáx – volume máximo; Vmín – volume mínimo. Fonte: Do autor (2023).

Já na Tabela 10, o mesmo acontece quando comparado aos valores da Tabela 9, ou seja, predominância da variável CV na primeira região de comportamento e  $P_a$  na segunda região de comportamento. Dessa forma, é visível que a variável estatística de precipitação CV é a que mais predominou nos melhores modelos ajustados para o algoritmo YBS, considerando a região de comportamento ascendente dos volumes.

TABELA 11 – Melhor variável estatística relativa à precipitação auxiliar ao ajuste dos modelos práticos para estimativa do volume de reservatórios de águas pluviais para fins não potáveis e volumes máximos e mínimos obtidos para cada um dos subgrupos definidos para a análise de volume máximo dos reservatórios por meio do algoritmo YAS

Grupo	Subgrupo	Variável 1R	Variável 2R	Vmáx (m <sup>3</sup> )	Vmín (m <sup>3</sup> )
C1	C1A	CV	-	87.954	1.394
	C1B	$P_{d,ch}$	$P_{d,se}$	94.575	2.530

	C1C	$P_{d,ch}$	$P_{d,3^{\circ}}$	62.834	3.832
	C1D	$P_{d,ch}$	$P_{d,3^{\circ}}$	83.638	5.316
	C1E	$P_d$	$P_{d,1^{\circ}}$	81.362	4.106
	C2A	$P_d$	$P_a$	73.654	13.104
	C2B	CV	$P_{d,ch}$	46.924	14.786
C2	C2C	$P_d$	$P_{d,3^{\circ}}$	47.440	7.547
	C2D	$P_{d,1^{\circ}}$	$P_{d,ch}$	27.786	9.883
	C2E	CV	$P_{d,2^{\circ}}$	27.145	6.059
	C2F	$P_m$	-	21.471	13.161

Em que: Variável 1R - Variável relativa à precipitação (1ª região); Variável 2R - Variável relativa à precipitação (2ª região);  $V_{m\acute{a}x}$  – volume máximo;  $V_{m\acute{i}n}$  – volume mínimo. Fonte: Do autor (2023).

As variáveis estatísticas relativas à precipitação que mais auxiliaram no ajuste de modelos, para o caso do algoritmo YAS – Volume Máximo (Tabela 11) foram, na primeira região de comportamento, CV e o  $P_{d,ch}$ , enquanto para a segunda região, foi  $P_{d,3^{\circ}}$ . Porém, de forma geral, para as duas regiões, a variável estatística  $P_{d,ch}$  foi a mais presente. Isso ocorre, devido a valores mais contínuos, isto é, uma ocorrência de chuvas mais recorrentes, dos períodos de chuva desses subgrupos. Com uma maior quantidade de dados de precipitação (diferente de zero) e um padrão mais regular de chuvas, a estimativa de um valor máximo para o reservatório dimensionado é mais preciso, pois ocorre o conhecimento de qual será a quantidade de precipitação máxima recorrente em um período do ano, permitindo saber qual é o valor máximo possível.

TABELA 12 – Melhor variável estatística relativa à precipitação auxiliar ao ajuste dos modelos práticos para estimativa do volume de reservatórios de águas pluviais para fins não potáveis e volumes máximos e mínimos obtidos para cada um dos subgrupos definidos para a análise de volume ótimo dos reservatórios por meio do algoritmo YAS

Grupo	Subgrupo	Variável 1R	Variável 2R	$V_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> )	$V_{m\acute{i}n}$ (m <sup>3</sup> )
C1	C1A	CV	-	7.643	0.268
	C1B	CV	$P_{d,3^{\circ}}$	8.768	0.585
	C2A	CV	$P_{d,1^{\circ}}$	9.724	0.675
	C2B	$P_{d,2^{\circ}}$	$P_{d,ch}$	9.066	0.900
	C2C	CV	$P_{d,ch}$	7.072	0.734
C2	C2D	CV	-	5.695	0.788
	C2E	CV	$P_{d,ch}$	10.217	1.078
	C2F	CV	$P_{d,ch}$	4.584	1.285
	C2G	CV	$P_{d,se}$	6.791	0.900

	C3A	CV	$P_{d,ch}$	5.672	0.848
C3	C3B	$P_{d,ch}$	$P_{d,ch}$	3.915	0.280
	C3C	CV	-	2.457	0.256

Em que: Variável 1R - Variável relativa à precipitação (1ª região); Variável 2R - Variável relativa à precipitação (2ª região);  $V_{m\acute{a}x}$  – volume máximo;  $V_{m\acute{i}n}$  – volume mínimo.

Fonte: Do autor (2023).

Na Tabela 12 é possível verificar que a variável estatística relativa à precipitação que predominou como a que melhor auxiliou no ajuste dos modelos, para a primeira região de comportamento é CV. Já para a segunda região, a variável predominante é a  $P_{d,ch}$ . Pode-se verificar que a variável CV foi a que mais auxiliou no ajuste dos modelos quando da modelagem dos volumes ótimos, e que esta não levou aos melhores modelos para em nenhum modelo de segunda região de comportamento

Ao observar os valores de CV em cada subgrupo que este levou ao melhor modelo, foi verificado que estes apresentam valores baixos para esta variável, quando comparados com outros subgrupos que apresentam maiores valores. Um valor baixo para essa variável indica uma distribuição mais uniforme das chuvas ao longo do tempo, facilitando o cálculo dos volumes observados e, por conseguinte, facilitando o ajuste dos modelos, já que não ocorrem variações bruscas do comportamento das chuvas nesses subgrupos, ao longo de um período.

## 6. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que foi possível modelar equações de comportamento de volume por determinada demanda de uso não potável de recurso hídrico, relacionando variáveis estatísticas relativas à precipitação, o que torna a estimativa do volume dos reservatórios mais simples, sem a necessidade de utilização discreta dos valores diários de precipitação para o dimensionamento.

A maioria dos melhores modelos ajustados foram relacionados à variável estatística CV, sendo mais marcante para os casos de Volume Ótimo e no caso de análise para a primeira região de comportamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Situação da água no mundo**. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/agua-no-mundo>> Acesso em: 06 de out. de 2020.

Addinsoft (2022). **XLSTAT statistical and data analysis solution**. <https://www.xlstat.com>.

AGSOLVE MONITORAMENTO AMBIENTAL. **Conhecimento do ciclo hidrológico das cidades facilita preservação**. AgSolve Monitoramento Ambiental, 2007. Disponível em: <<https://www.agsolve.com.br/noticias/416/conhecimento-do-ciclo-hidrologico-das-cidades-facilita-preservacao->> Acesso em: 02 de out. de 2020.

AMORIM, S. V. de; PEREIRA, D. J. de A. **Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.8, n. 2, abr./jun. 2008.

ANDRADE, V. H. de. **Ferramenta gráfica para i dimensionamento de reservatórios para aproveitamento de águas pluviais. Estudo de caso na região Norte de Rondônia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10844**: Instalações hidráulicas de águas pluviais. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527**: Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

BACCI, D. de L. C.; PATACA, E. M. **Educação para a água**. Estudos avançados, v. 22, n. 63, 2008.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 9 jan 1997.

BRESSAN, E. Obras de contenção de cheias em Curitiba somam R\$ 151 milhões (2016) Prefeitura Municipal de Curitiba. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/obras-de-contencao-de-cheias-em-curitiba-somam-r-151-milhoes/38999> Acesso em: 13 jun 2021.

CAMPOS, M. A. S. **Aproveitamento de água pluvial em edifícios residenciais multifamiliares na cidade de São Carlos**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

CARVALHO JÚNIOR, R. de. **Instalações Hidráulicas e o Projeto de Arquitetura**. 7. ed. São Paulo: Blücher, 2013.

CARVALHO JÚNIOR, R. de. **Instalações prediais hidráulico-sanitárias princípios básicos para elaboração de projetos**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2014.

CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. **Hidrologia**. Apostila digital, 2006. Instituto de Tecnologia - Departamento de Engenharia - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/it113-hidrologia.htm>> Acesso em: 02 de out. de 2020.

**Casa eficiente**: uso racional da água / editores: Robert Lamberts... [et al.]. Florianópolis: UFSC/LabEE; 2010 v. 3

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **O problema de escassez de água no mundo**. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/informacoes-basicas/tpos-de-agua/o-problema-da-escasez-de-agua-no-mundo/>> Acesso em: 06 de out. de 2020.

COLLA, L. L. **Sistemas de Captação e Aproveitamento de Água de Chuva**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2008.

CORREA, Junio Aparecido Pereira. **Modelos Matemáticos para o Dimensionamento Prático de Reservatórios para o Aproveitamento Predial de Águas Pluviais em Minas Gerais**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2021. Orientador: Michael Silveira Thebaldi. 163 p.

CREDER, H. **Instalações Hidráulicas e Sanitárias**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

DORNELLES, F. **Aproveitamento de água de chuva no meio urbano e seu efeito na drenagem pluvial**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FARIA, Raquel Silveira; THEBALDI, Michael Silveira; MERLO, Marina Neves. **Análise técnica e econômica do dimensionamento de reservatórios de águas pluviais para fins não potáveis em condomínio vertical e horizontal**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 10, n. 1, p. 119-142, 2021.

FAVARO, P. P. F. **Indicação das patologias relacionadas as calhas com comparativo de dimensionamento utilizando a NBR 10844/1989 e a equação de chuva da cidade de Cuiabá-MT**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Orientações Básicas para Drenagem Urbana**. Belo Horizonte: FEAM, 2006. Disponível em:

<<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/Cartilha%20Drenagem.pdf>> Acesso em: 20 de out. de 2020.

FEWKES, A. **Modelling the performance of Rainwater collection systems: towards a generalised approach.** Urban Water, v.1, 1999.

FONTANELA, F. **Avaliação de metodologias para dimensionamento de reservatórios para aproveitamento de água pluvial.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2010.

GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Localização Geográfica, 2020. Disponível em: <<https://www.mg.gov.br/conteudo/conheca-minas/geografia/localizacao-geografica#:~:text=As%2012%20mesorregi%C3%B5es%20estabelecidas%20pelo,das%20Vertentes%20e%20Zona%20da>> Acesso em: 10 dez. 2020.

GROUP RAINDROPS. **Aproveitamento da Água da Chuva.** 1. ed. Curitiba: Organic Tranding, 2002.

GUIMARÃES, D. P; REIS, R. J. dos; LANDAU, E. C. **Índices Pluviométricos em Minas Gerais.** Sete Lagoa: EMPRAPA, 2010.

HAGEMANN, S. E. **Avaliação da qualidade da água da chuva e da viabilidade de sua captação e uso.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2020,** 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>> Acesso em: 14 dez. 2020.

JENKINS, D. et al. **Feasibility of rainwater collection systems in California.** In: Contribution N. 173. California Water Resources Center. University of California, 1978.

MACINTYRE, A. J. **Instalações Hidráulicas: Prediais e Industriais.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MANO, R. S. **Captação Residencial de Água Pluvial, para Fins Não Potáveis, em Porto Alegre: Aspectos Básicos da Viabilidade Técnica e dos Benefícios do Sistema.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MARINOSKI, A. K. **Aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis sem instituição de ensino: estudo de caso em Florianópolis – SC.** 2007. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MAY, S. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MOTA, S. **Gestão ambiental de recursos hídricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2008.

NGIGI, S. N.; Optimization of rainwater catchment systems design parameters in the arid and semiarid lands of Kenya. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA, 9., 1999, Petrolina. **Anais eletrônicos...** Petrolina: Embrapa, 1999. Disponível em: <[http://www.cpatsa.embrapa.br/catalogo/start\\_inicio.html](http://www.cpatsa.embrapa.br/catalogo/start_inicio.html)>. Acesso em: 15 nov. 2020.

**No Dia Mundial da Água, Guterres lembra que cerca de 2,2 bilhões carecem de água potável.** ONU News, 2020. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2020/03/1708162>> Acesso em: 14 de out. de 2020.

**O ciclo da água.** Engenharia Onde Já Civil, 2011. Disponível em: <<https://engenhariaondejahcivil.blogspot.com/>> Acesso em: 02 de out. de 2020.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2019:** Não deixar ninguém para trás. Disponível em: <[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882\\_por?fbclid=IwAR0yBI24uVUHZp5Gm4pLws8vYjRmdq4AX282A-aUfcpyXtYjC8olwrON4JA](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_por?fbclid=IwAR0yBI24uVUHZp5Gm4pLws8vYjRmdq4AX282A-aUfcpyXtYjC8olwrON4JA)> Acesso em: 15 de out. de 2020.

PENA, R. F. A. **Atividades que mais consomem água.** Brasil Escola, 2020. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/atividades-que-mais-consohem-agua.htm>>. Acesso em: 17 de out. de 2020.

PEREIRA, M. M. **Aproveitamento de água da chuva no pavilhão de aula 1 da UFRB: Possibilidades e limitações.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2019.

PINTO, Pâmela Rafanele França. **Influência da variabilidade temporal e espacial da precipitação sobre o dimensionamento de reservatórios para aproveitamento de águas pluviais.** 2022. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2022.

RODRIGUES, L. V.; LEITE, M. P. **Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento domiciliar de águas pluviais em municípios de regimes pluviométricos distintos.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

SAMPAIO, F. E. de O. V; ALVEZ, C. de M. A. **Procedimento para análise da viabilidade de implantação de sistemas de aproveitamento de águas pluviais em centros urbanos por meio de diagramas de pré-dimensionamento.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.22, e60, jun., 2017. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/F5KBjsqjPBLQHKvgP6JBMMj/?lang=en> > Acesso em: 06 de fev. de 2021.

SILVA, M. A. **Previsão da precipitação pluvial por meio de redes neurais artificiais treinadas utilizando diferentes variáveis climáticas.** 2021. 56 p. Dissertação (Mestrado

em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

SNIRH – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.

SNIS – SECRETÁRIA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO.

**Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2018.** Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico-SNIS-AE-2018-Capitulo-08.pdf>> Acesso em: 20 de nov. de 2020.

SOUSA, A. B. de; ANDRADE NETO, C. O. de; MAIA, A. G. **Análise dos métodos de dimensionamento de cisternas com base na avaliação de volumes calculados para zonas pluviais distintas.** Gesta, v. 5, n. 2, p. 147-160, 2017.

TOMAZ, P. Aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas para fins não potáveis. Oceania, v. 65, n. 4, 2009.

TUCCI, Carlos E. M. Águas Urbanas. In: TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul.** 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.