



**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

GUSTAVO RECHE SANTA ROSA

**REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA EM UNIDADES PRISIONAIS
DO ESTADO DE SANTA CATARINA, BRASIL.**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS
UNISUL/PPGCA**

Palhoça, 2023

GUSTAVO RECHE SANTA ROSA

**REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA EM UNIDADES PRISIONAIS
DO ESTADO DE SANTA CATARINA, BRASIL.**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais,
como quesito parcial à obtenção do título
de Mestre em Ciências Ambientais

Orientador: Dra. Anelise Leal Vieira Cubas

Coorientador: Dr. Gabriel Cremona Parma

R71 Rosa, Gustavo Reche Santa, 1983-
Reaproveitamento da água da chuva em unidades prisionais do
estado de Santa Catarina, Brasil / Gustavo Reche Santa Rosa. – 2024.
66 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Sul de Santa Catarina,
Pós-graduação em Ciências Ambientais.
Orientação: Profa. Dra. Anelise Leal Vieira Cubas.
Coorientação: Prof. Dr. Gabriel Cremona Parma

1. Captação de água da chuva. 2. Sistema penitenciário. 3.Redução
no consumo.. I. Cubas, Anelise Leal Vieira. II. Parma, Gabriel
Cremona. III. Universidade do Sul de Santa Catarina. IV. Título.

CDD (21. ed.) 631.7

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA EM UNIDADES
PRISIONAIS DO ESTADO DE SANTA CATARINA, BRASIL**

GUSTAVO RECHE SANTA ROSA

Aprovada pela banca avaliadora de defesa
de dissertação em 29 de fevereiro de 2024.



Dr.ª Anelise Leal Vieira Cubas
Orientadora e Presidente da banca



Dr. Gabriel Cremona Parma
Coorientador, Universidade do Sul de Santa Catarina



Dra. Marina Medeiros Machado
Avaliadora externa



Ana Regina Aguiar Dutra
Avaliadora interna, Universidade do Sul de Santa Catarina



Fonte: odsbrasil.gov.br

Esta dissertação está inserida no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável/ODS número 6 “*Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos*”, da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU).

A dissertação contribui para a Meta número 6.4 que prevê “*até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água*”. Para isso lançamos mão do Indicador 6.4.1- “*Alteração da eficiência no uso da água ao longo do tempo*”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades e caminhos na minha vida, sempre escrevendo certo com linhas tortas.

A meus pais, Laurides e Mário que sempre me apoiaram e desde cedo me mostraram que a educação e o trabalho é o caminho correto.

A minha esposa Michele. Sempre ao meu lado, mesmo nas horas mais difíceis. Lembra como éramos e veja como estamos. Agora imagina onde podemos chegar. Te amo sua chata.

A minha filha Isadora. Luz da minha vida. Paixão do pai.

Aos professores Jair Juarez João e Rachel Faverzani Magnago que estiveram comigo como orientadores no início deste trabalho.

A professora, minha orientadora, Anelise Leal Vieira Cubas, que aceitou o desafio de me orientar na reta final do mestrado e ao professor Gabriel Cremona Parma pelos conselhos e ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos colegas da GETED/SAP que sempre que precisei de algum dado para realização deste trabalho me auxiliaram prontamente.

E por último e não menos importante, agradeço a Secretaria de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa – SAP especialmente aos Ex-Secretários de Estado da SAP, Leandro Antônio Soares de Lima e Edemir Alexandre Camargo Neto, colegas de farda que oportunizaram a realização deste trabalho.

RESUMO

O sistema penitenciário de Santa Catarina é referência nacional na ressocialização dos apenados sobre a custódia do estado. Isso se dá por intermédios das políticas públicas do governo estadual que contribuem para o desenvolvimento do trabalho e estudo dentro e fora das unidades prisionais catarinense. A reforma e construção de novas unidades prisionais devem ser projetadas e executadas visando a maior eficiência em segurança, redução do efetivo de funcionários, economia de água e energia elétrica além da redução da geração de resíduos. O consumo de água dentro de estabelecimentos prisionais pelos apenados é um fator que gera altos custos ao erário devido vários fatores como más condições das unidades prisionais, falta de manutenção dos sistemas hidráulicos e desperdícios pelos apenados. A captação de água da chuva se apresenta como uma alternativa para redução do consumo de água dentro das unidades prisionais catarinenses. O estado de Santa Catarina apresenta índices pluviométricos satisfatórios a implementação de sistemas de captação de água da chuva em suas prisões, contribuindo assim para redução dos custos com fornecimento de água aos apenados, principalmente em relação ao consumo de água relacionado a limpeza e higiene das unidades prisionais. Nesse contexto, essa dissertação tem por objetivo apresentar a captação da água da chuva como uma alternativa no fornecimento de água aos apenados visando a redução de custos e a redução dos gastos de água com atividades onde não são necessários o fornecimento de água potável. Este trabalho está dividido em três capítulo sendo que no capítulo 1, foi realizado um levantamento dos volumes de água consumidos em cinco complexos penitenciários de Santa Catarina assim como os valores gastos pelo estado com o fornecimento de água nos anos de 2021 e 2022. Observou-se que o consumo em unidades prisionais catarinenses é muito inferior ao registrado na literatura, porem os valores gastos nos anos avaliados supera US\$ 1,8 milhões. No capítulo 2, foi utilizado a modelagem dinâmica de sistemas por meio do software Vensim para realizações de simulações sobre a viabilidade de implantação de sistemas de captação de água da chuva nos mesmos complexos penitenciários analisados no capítulo 1. Foram encontrados valores de redução do volume de mais de 45% em quatro dos cinco complexo penitenciários estudados sendo que no complexo penitenciário de São Cristóvão do Sul - SCS e no complexo penitenciário de Chapecó - CHAP a captação de água da chuva considerando o mínimo histórico registrado, já supre toda a necessidade de água para limpeza dos estabelecimentos prisionais. E no capítulo 3 foi realizado um estudo de caso em um presídio localizado no

município de Tubarão-SC onde foi avaliada a possibilidade de utilização da água da chuva após tratamento com filtro de carvão ativado. Após o tratamento, os resultados mostraram-se satisfatórios para a utilização da água da chuva para usos não nobres.

Palavras-chave: Sistema penitenciário, Captação de água da chuva, Redução no consumo

ABSTRACT

The prison system in Santa Catarina is a national benchmark in the rehabilitation of inmates under state custody. This is achieved through state government public policies that contribute to the development of work and education both inside and outside the Santa Catarina prison facilities. The reform and construction of new prison units should be designed and executed to achieve greater efficiency in security, reduce the number of staff, save water and electricity, and minimize waste generation. Water consumption within prison establishments by inmates is a factor that incurs high costs to the public treasury due to various factors such as poor conditions of the prison units, lack of maintenance of hydraulic systems, and wastage by inmates. Rainwater harvesting presents itself as an alternative to reduce water consumption within Santa Catarina's prison units. The state of Santa Catarina has satisfactory rainfall indices for the implementation of rainwater harvesting systems in its prisons, thus contributing to the reduction of costs associated with supplying water to inmates, especially regarding water consumption related to the cleanliness and hygiene of prison facilities. In this context, this dissertation aims to present rainwater harvesting as an alternative in supplying water to inmates, aiming to reduce costs and decrease water expenses for activities where potable water is not necessary. This work is divided into three chapters. In Chapter 1, a survey of water volumes consumed in five prison complexes in Santa Catarina was conducted, along with the state's expenditures on water supply in the years 2021 and 2022. It was observed that water consumption in Santa Catarina's prison units is much lower than reported in the literature, but the expenses for the evaluated years exceed US\$ 1.8 million. In Chapter 2, dynamic system modeling using the Vensim software was employed to simulate the feasibility of implementing rainwater harvesting systems in the same prison complexes analyzed in Chapter 1. Reduction values of over 45% in volume were found in four out of the five prison complexes studied, with rainwater harvesting in the São Cristóvão do Sul - SCS and Chapecó - CHAP prison complexes, considering the minimum historical record, already meeting all the water needs for cleaning the prison facilities. In Chapter 3, a case study was conducted in a prison located in the city of Tubarão-SC, evaluating the possibility of using rainwater after treatment with activated carbon filters. After treatment, the results proved satisfactory for the use of rainwater for non-potable purposes.

Keywords: Prison system, Rainwater harvesting, Water consumption reduction

SUMÁRIO

RESUMO	06
ABSTRACT	08
INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1: Avaliação de captação de água de chuva para cinco complexos prisionais do estado de Santa Catarina, Brasil: um olhar para sustentabilidade hídrica.....	13
CAPÍTULO 2: Estimativa do volume de água da chuva captada no sistema penitenciário de Santa Catarina, Brasil, utilizando modelagem dinâmica de sistema.....	28
CAPÍTULO 3: Case Study: Evaluation and Reuse of Rainwater in a Prison in Santa Catarina State, Brazil.....	51
CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS BLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

A excelência do sistema penitenciário do estado de Santa Catarina na ressocialização dos apenados sobre sua custódia é reconhecida nacionalmente no país. Isso se dá pela aplicação de políticas públicas voltadas a ressocialização por meio do trabalho e do estudo dos apenados, garantindo assim a remissão de pena aplicada a eles. Mas isso não é possível de ocorrer sem uma infraestrutura adequada que proporciona a execução dessas políticas ressocializadoras. O investimento em construções, reformas e ampliações das unidades prisionais catarinenses ultrapassa R\$ 15.000.000,00 (quinze milhões de reais) todos os anos desde 2013 (Brasil, 2023).

Um item tão importante quanto a muralha de proteção de uma unidade prisional ou as câmeras de vigilância é o fornecimento de água aos apenados. Para sustentar a vida a água é essencial, com isso o abastecimento seguro e suficiente deve ser disponibilizado a todos (Perveen, 2023) pois o acesso a água potável pode resultar em benefícios reais para a saúde (ESCAP, 2013).

Com isso, o desenvolvimento de novas fontes de água potável continua a ser um desafio mundial no século XXI. (Robert J. Ohlund 2024). Nesse contexto, a captação de água de chuva representa uma alternativa importante para suprir as demandas de água em todo o mundo (Gomes et al. 2014).

Porém, a viabilidade da implantação de um sistema captação de água da chuva depende de vários fatores, mas principalmente da pluviometria da região. Para auxiliar nessa análise, a modelagem dinâmica de sistemas se apresenta como uma ferramenta extremamente útil pois a modelagem de sistemas dinâmicos analisa as variações ao longo do tempo, apresentando diferentes cenários (Hadiwibowo, et al. 2021), contribuindo assim para a escolha da melhor decisão dos gestores públicos na tomada de decisões.

Com tudo, dependendo do uso da água captada da chuva, se faz necessário um pré tratamento ou até mesmo um tratamento completo, tornando-a adequada ao consumo. A qualidade da água coletada e o seu destino final é que vão definir o tipo e a necessidade de tratamento das águas pluviais. (El Tugoz et al. 2017). Dessa forma, a água da chuva pode ser qualificada como limpa e segura, desde que o sistema instalado para sua captação seja adequado e a água receba o tratamento em nível maior ou menor, conforme sua destinação ao uso potável ou não potável (Goldenfum,2006).

Assim, o presente estudo buscou contribuir com pesquisas que abordam o consumo de água dentro dos estabelecimentos prisionais do estado de Santa Catarina, assim como a viabilidade de implantação de um sistema de captação de água da chuva por meio do uso da modelagem dinâmica de sistemas e o tratamento da água da chuva com a utilização de um filtro de carvão ativado. A dissertação está dividida em três capítulos, apresentados na forma de artigos científicos sendo que um já foi publicado em revista científica, um foi apresentado em congresso internacional e um será submetido a publicação.

O capítulo 1 se refere ao artigo “Avaliação de captação de água de chuva para cinco complexos prisionais do estado de Santa Catarina, Brasil: um olhar para sustentabilidade hídrica.” buscou realizar um levantamento do consumo de água dentro de cinco complexos penitenciários de Santa Catarina. O artigo foi publicado dos Anais do Congresso Internacional de Sustentabilidade: A Cidade E Sociedade| 2023.

O capítulo 2 Intitulado “Estimativa do volume de água da chuva captada no sistema penitenciário de Santa Catarina, Brasil, utilizando modelagem dinâmica de sistema.” Tem por objetivo avaliar o potencial para a instalação de sistemas de captação de água da chuva em unidades prisionais de Santa Catarina utilizando a modelagem de sistemas dinâmicos. O referido artigo será submetido a publicação em revista científica.

E por fim, o capítulo 3 intitulado “Case Study: Evaluation and Reuse of Rainwater in a Prison in Santa Catarina State, Brazil.” Já publicado na revista Journal of Agricultural Studies ISSN 2166-0379 2022, Vol. 10, No. 4, teve por objetivo submeter a água da chuva coletada ao tratamento por um filtro de carvão ativado apresentando assim, a viabilidade econômica para a instalação de um sistema de captação da água da chuva em um presídio localizado no município de Tubarão – SC.

OBJETIVOS

Objetivo Geral: Contribuir com a apresentação de dados referentes ao consumo de água dentro dos estabelecimentos prisionais do estado de Santa Catarina assim como demonstrar alternativas para redução do consumo e dos custos por meio da captação de água da chuva.

O capítulo 1 tem por objetivos específicos:

- a. Apresentar os valores referentes aos volumes de água consumidos em cinco complexos penitenciários de Santa Catarina.

- b. Demonstrar os valores gastos (US\$) pelo estado de Santa Catarina para o fornecimento de água aos apenados nos anos de 2021 e 2022.

O capítulo 2 apresenta como objetivo específico:

- a. Verificar a viabilidade de implementação de sistemas de captação de água da chuva em complexos penitenciários por meio da modelagem dinâmica de sistemas.

O capítulo 3 tem como objetivo específico:

- a. Realizar um estudo de caso para avaliar a possibilidade de reaproveitamento da água da chuva em uma unidade prisional.

CAPÍTULO 1

Avaliação de captação de água de chuva para cinco complexos prisionais do estado de Santa Catarina, Brasil: um olhar para sustentabilidade hídrica.

Rosa, G. R. S. (1) Magnago, R. M. (2) Cubas, A. L. V (3)

(1) Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Sul de Santa Catarina, Brasil. E-mail: gustavorsr83@gmail.com

(2) Tecnologias Sustentáveis Integradas – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. E-mail: rachel.magnago@animaeducacao.com.br

(3) Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Sul de Santa Catarina, Brasil. E-mail: anelise.cubas@animaeducacao.com.br

Resumo: No contexto do sistema prisional, o estado de Santa Catarina se destaca na ressocialização de apenados, investindo na construção e reforma de unidades prisionais. As diretrizes para a arquitetura penal recomendam a consideração de instalações para armazenamento e distribuição de água potável, saneamento adequado, reuso de água e aproveitamento de águas pluviais. O consumo de água dentro das unidades prisionais varia e não há normas técnicas específicas para isso no Brasil. Estudos indicam um consumo per capita de água variando entre 100 a 500 litros por apenado por dia. O estudo foi realizado em cinco complexos penitenciários do estado de Santa Catarina, abrangendo diferentes regiões do estado. Os dados sobre capacidade, unidades prisionais e número de apenados foram obtidos junto à Secretaria de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa do estado de Santa Catarina. As informações sobre as precipitações foram obtidas junto à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Os resultados demonstram que os cinco complexos penitenciários estudados apresentam um consumo de água em litros por apenado por dia abaixo dos valores encontrados na literatura. O estudo também avaliou o potencial hipotético de utilização de água captada da chuva. Em resumo, a captação de água da chuva é uma alternativa promissora para auxiliar na economia de água, mas sua viabilidade econômica depende de diversos fatores, como custos de instalação, tempo de retorno do investimento, o que não foram abordados neste trabalho. O objetivo deste trabalho consiste em investigar a captação e reutilização de água da chuva como forma de redução de custos e consumo de água potável pelos estabelecimentos prisionais do estado de Santa Catarina.

Palavras-chave: Sistema prisional; Aproveitamento de água da chuva.

Abstract: Within the context of the penal system, the state of Santa Catarina stands out in the rehabilitation of inmates, investing in the construction and renovation of prison facilities. The guidelines for penal architecture advise considering facilities for the storage and distribution of potable water, appropriate sanitation, water reuse, and rainwater harvesting. Water consumption

within prison facilities varies, and there are no specific technical standards for this in Brazil. Studies indicate a per capita water consumption ranging between 100 to 500 litres per inmate per day. The research was conducted in five penitentiary complexes in the state of Santa Catarina, encompassing various regions of the state. Data regarding capacity, prison units, and the number of inmates were sourced from the State Department of Prison and Socioeducational Administration of Santa Catarina. Information on precipitation was acquired from the Santa Catarina Agricultural Research and Rural Extension Company. The results show that the five examined penitentiary complexes have a water consumption in litres per inmate per day below the figures found in literature. The study also evaluated the hypothetical potential of using harvested rainwater. In summary, rainwater harvesting is a promising alternative to aid in water conservation, but its economic viability depends on several factors, such as installation costs, return on investment time, which were not addressed in this work. The present study aims to investigate the capture and reuse of rainwater as a way of reducing costs and consumption of drinking water by prison establishments in the state of Santa Catarina.

Key-words: *prison system; water; rainwater harvesting.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Água

A água como recurso essencial a vida torna-se cada vez mais valiosa aos seres humanos e animais. Essa escassez é intensificada pelas mudanças climáticas e está se tornando um grande problema para as gerações presentes e futuras (Kummu et al. 2016). Echeverría (2021) afirma que as reservas disponíveis de água doce no mundo cairão em até 40% até o final desta década em decorrência do aumento populacional, e suas implicações como demanda de alimentos e irrigação irracional. Com isso mais de 50% da população global sofrerá escassez de água.

Assim, devemos ficar alertas pois a dependência do acesso a água em quantidades suficientes e de boa qualidade é um dos fatores limitantes para o sucesso na sobrevivência de uma população (Niknam et al. 2023; Penserini et al. 2023).

1.2 Captação de água

A captação de água da chuva consiste em coletar a água escoada pelos telhados por meio de calhas fixadas nos beirais dos telhados e direcionadas por meio de tubulações até tanques de armazenamento. O sistema de captação é composto basicamente de três componentes principais: captação, armazenamento e tratamento (Stang et al. 2021).

Em decorrência da extrema necessidade de água para o abastecimento dos grandes centros populacionais, a captação de água da chuva vem se mostrando ao longo dos anos como uma alternativa promissora. Ambientes residenciais, comerciais, de prestação de serviços e industriais podem ter um sistema de captação de água pluvial instalado. A água coletada e armazenada pode ser utilizada diretamente para fins não nobres como irrigação de jardins, lavagem de carros e descargas ou ainda podem ser destinadas ao consumo humano e de animais após passarem pelo devido tratamento onde é comprovada sua potabilidade por meio de análises laboratoriais conforme a legislação vigente.

Dois fatores extremamente relevantes quando se cogita a implementação de um sistema de captação de água da chuva são os custos de instalação do projeto e o tempo de retorno do investimento.

Assim, a captação de água da chuva é cada vez mais objeto de estudo para o abastecimento de água em regiões onde não há sistemas centralizados de abastecimento de água ou para contribuir com o reaproveitamento e racionamento deste recurso (João et al., 2022; Silva et al., 2022). Maykot and Ghisi, (2020) realizaram uma avaliação econômica em um sistema de captação de água da chuva instalado em um prédio de vários andares no Brasil e concluíram que o tempo de retorno do investimento varia de seis a onze anos, dependendo do uso da água, além de revelarem que os tanques de armazenamento da água coletada estavam superdimensionados. Campos et al., (2020) corrobora com essa afirmação quando apresentam a viabilidade econômico-financeira de sistemas de captação de água da chuva no Brasil e demonstram um período de retorno financeiro de seis anos para prédios pequenos e de 10 anos para prédios grandes. Ainda, estudo sobre captação de água da chuva realizado na Jordânia, Abdulla, (2020) demonstrou que dependendo das condições das chuvas coletadas, dos tamanhos dos telhados utilizados na captação, da economia de água e dos tipos de tanques utilizados para o armazenamento, o período de retorno para equalizar o custo associado a instalação de sistemas de captação de água da chuva pode variar de cinco a quarenta e cinco anos.

Porém, um fator extremamente importante para a determinação da viabilidade econômica da implementação de um sistema de captação de água da chuva é o custo da água potável

na região (Amos et al., 2018; Abdulla, 2020; Bus and Szelagowska, 2021; Preeti and Rahman, 2021).

Alguns exemplos de utilização prática da captação de água da chuva podem ser observados no Sesc Birigui, localizado em São Paulo e na Green School de Bali - Indonésia, conforme descrito por Azevedo (2015). O Sesc Birigui implementou um sistema de captação de água da chuva para abastecimento. A água coletada é utilizada para fins não potáveis, como descarga de banheiros, limpeza e irrigação de jardins.

1.3 Sistema Prisional

O sistema penitenciário do estado de Santa Catarina é destaque na forma como conduz a ressocialização dos apenados sob sua custódia. Para isso, o estado vem investindo recursos, desde o ano de 2013, na construção de novas unidades prisionais assim como na reforma e ampliação de unidades mais antigas com o intuito de proporcionar a melhora na qualidade de vida dos apenados. Quando se trata da construção de uma unidade prisional as Diretrizes Básicas de Arquitetura Criminal, elaboradas pelo Ministério da Justiça e Segurança Pública (Brasil, 2011) devem ser seguidas, pois são elas determinam os elementos básicos que uma unidade prisional deve conter.

Quando tratamos do fornecimento de água aos apenados, as Diretrizes Básicas para Arquitetura Penal descrevem que as edificações devem ser projetadas, preferencialmente, considerando as instalações necessárias para o armazenamento e distribuição de água potável, bem como a condições sanitárias adequadas, tubulações de água e esgoto, sistema de drenagem, reuso de água e aproveitamento de águas pluviais (Brasil, 2011).

O consumo de água pelos apenados não segue o consumo descrito na literatura para população em geral. Não existe no Brasil uma norma técnica ou diretriz, de âmbito federal, que aborde o consumo de água dentro de unidades prisionais, além disso, poucos autores têm abordado o consumo per capita por apenado. Sperling (2005) apresenta um consumo per capita nas unidades prisionais de 200 a 500 litros/apenado/dia enquanto a norma técnica elaborada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP - NTS 181) sugere entre 100 a 190 litros/apenado/dia SABESP, (2017). Pereira (2014) estudou o consumo de água e energia elétrica em uma unidade prisional em Lisboa no ano de 2013 e encontrou uma média de consumo de água de 451,48 litros/apenado/dia. Fernandes (2016) encontrou em seus estudos realizados em um presídio de Varginha-MG no ano de 2015, uma média anual de consumo de 381,18 litros/apenado/dia.

2 OBJETIVO

O presente estudo tem por objetivo investigar a captação e reutilização de água da chuva como forma de redução de custos e consumo de água potável pelos estabelecimentos prisionais do estado de Santa Catarina. Os sistemas de captação de água da chuva para propriedades públicas ou privadas estão alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que compõem a agenda estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU) a ser cumprida até 2030, especificamente o ODS 6, que trata da água e saneamento e o ODS 12, que trata do consumo e produção sustentáveis.

3 JUSTIFICATIVA

O reaproveitamento de água da chuva em estabelecimentos prisionais é um tema pouco dístico na literatura. Devido a falta de estudos sobre o tema e normas específicas que definam o consumo de água em estabelecimentos prisionais, essa pesquisa vem para auxiliar gestores públicos no desenvolvimento de políticas públicas e na construção e adequação de unidades prisionais.

4 MÉTODO EMPREGADO

4.1 Áreas de estudo

O estado de Santa Catarina possui um total de 54 unidades prisionais em todas as mesorregiões (SAP 2023). Os estudos foram realizados em cinco Complexos Penitenciários de Santa Catarina distribuídos em cinco das seis mesorregiões do estado, sendo elas: Grande Florianópolis, Vale do Itajaí, Sul, Serrana e Oeste. Na Figura 1 tem-se a localização dos municípios que os sistemas prisionais estão localizados.

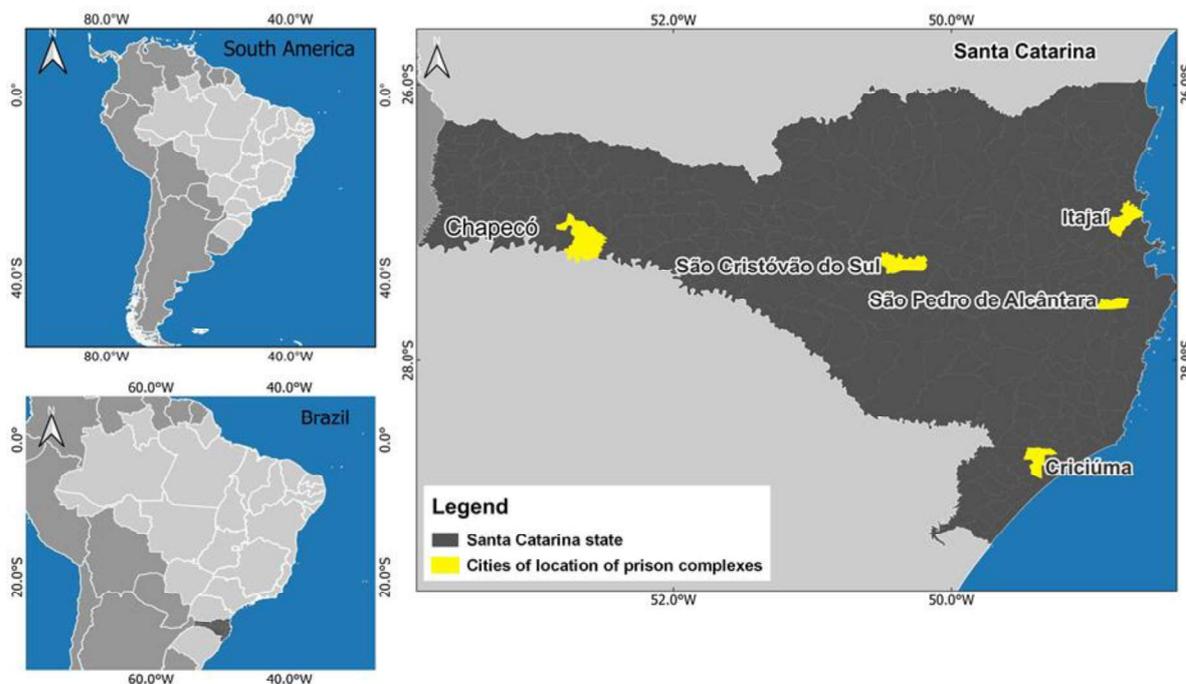


Figura 1: Municípios de localização dos Complexos Prisionais.

O Complexo Penitenciário da mesorregião da Grande Florianópolis está localizado no município de São Pedro de Alcântara e recebe o nome de Complexo Penitenciário do Estado - COPE. Sua capacidade de custódia de pessoas em conflito com a lei é de 1.300 vagas em regime fechado de cumprimento de sentença. O complexo é composto de uma unidade prisional e conta com estação de tratamento de esgoto – ETE e estação de tratamento de água – ETA própria com vazão de projeto de 14 l/s e 10 l/s respectivamente. Sua posição geográfica está definida pelas coordenadas UTM: 721763.57 E; 6947220.63 S.

No município de Criciúma está instalado o Complexo Penitenciário de Criciúma, composto pela Penitenciária Sul e Penitenciária Feminina de Criciúma. Este complexo possui um total de 1.122 vagas e possui ETE própria com vazão de projeto de 13,5 l/s. Este estudo foi realizado nas duas unidades prisionais que compõem o complexo. O abastecimento de água do complexo penitenciário é realizado pela Companhia Catarinense de Água e Esgoto – CASAN. O complexo penitenciário está localizado pelas coordenadas UTM 659527.97 E; 6807773.96 S.

Na mesorregião do Vale do Itajaí, no município de Itajaí, está instalado o Complexo Penitenciário do Vale do Itajaí – CPVI, coordenadas UTM 728702.13 E; 7014649.40 S, composto pela Penitenciária, Presídio Regional de Itajaí e Presídio Feminino Regional de Itajaí. Este complexo possui um total de 2.790 vagas e possui ETE própria com vazão de

projeto de 14,5 l/s. O abastecimento de água é realizado pelo Serviço Municipal de água, saneamento básico e infraestrutura – SEMASA.

Erguida no encontro do rio Itajaí-Açu com o mar, Itajaí fica situada no litoral norte de Santa Catarina, estado da região sul do Brasil. Itajaí está às margens da BR-101, 100 km ao norte de Florianópolis. O Aeroporto Internacional de Navegantes fica a 20 km de distância pelas rodovias BR 101 e BR 470 ou a 15 minutos pelo ferry-boat.

Localizado no município de São Cristóvão do Sul, está em operação o Complexo Penitenciário de São Cristóvão do Sul, Coordenadas UTM 556136.33 E; 6983903.30 S, constituído de três unidades prisionais, sendo elas: a Penitenciária Regional de Curitiba, a Penitenciária de São Cristóvão do Sul e a Unidade de Segurança Máxima de São Cristóvão do Sul. Este complexo tem capacidade 1756 vagas e conta com o tratamento de esgoto por meio de ETE própria e o abastecimento de água realizado, parte por meio da CASAN e parte por meio de dois poços localizados dentro do complexo. A vazão de projeto da ETE é de 12 l/s.

No oeste do estado, localizado no município de Chapecó, com 2.526 vagas, está instalado o Complexo Penitenciário de Chapecó, coordenadas UTM 334152.44E; 7000397.98 S, sendo este o maior complexo prisional do estado com um total de cinco unidades, sendo quatro unidades prisionais e uma unidade socioeducativa. As unidades prisionais e socioeducativas são as seguintes: Penitenciária Agrícola de Chapecó, Penitenciária Industrial de Chapecó, Presídio Feminino Regional de Chapecó, Presídio Regional de Chapecó, Centro de Atendimento Socioeducativo - CASE Regional de Chapecó e o Centro de Internação Feminino – CIF de Chapecó, sendo estes dois últimos localizados no mesmo prédio. Este complexo conta com o abastecimento de água sendo realizada parte por intermédio da CASAN, parte pela captação de água subterrânea por meio de três poços e parte pela captação de água superficial por meio de três caxambus. Toda água captada, subterrânea e superficial, passa por tratamento em uma ETA própria, com capacidade de tratamento de projeto de 6 l/s. O esgoto é tratado em ETE própria com capacidade de projeto de 15 l/s.

Para simplificar a redação será adotada a seguinte nomenclatura para os complexos penitenciários, sendo Complexo Penitenciário do Estado – COPE; Complexo Penitenciário de Itajaí – CPVI; Complexo Penitenciário de São Cristóvão do Sul – SCS; Complexo Penitenciário de Criciúma – CRIC e Complexo Penitenciário de Chapecó – CHAP.

4.2 Levantamento dos dados

Os dados referentes ao número de vagas, número de unidades prisionais, número de pessoas sob a custódia do estado foram obtidos junto a Secretaria de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa – SAP por meio de pesquisa em software próprio de gestão penitenciária do Estado de Santa Catarina, intitulado de IPEN – Sistema de Informações Penitenciárias.

Já os dados referentes às precipitações ocorridas nas localidades alvo de estudos, foram obtidos junto a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) por intermédio do Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina através de solicitação por e-mail conforme descrito no site <https://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php/solucoes/solicitacao-de-dados/>.

O consumo de água nos complexos penitenciários foi obtido por meio das faturas mensais dos anos de 2021 e 2022 assim como os valores gastos pelo estado de Santa Catarina para fornecimento de água aos internos.

4.3 Cálculo e estimativa do volume de água captado

Para os cinco complexos penitenciários foram observados os telhados que melhor se adequariam a captação de água da chuva, sendo descartados os telhados com muitos recortes e/ou pequenos (menor que 100 m²). Por se tratar de unidades prisionais, o quesito segurança tem sempre que ser o primeiro a ser avaliado e considerado. Com isso, não foi considerado as áreas de telhados das unidades prisionais que ficam em cima das celas dos apenados, deste modo os policiais penais que trabalham nas unidades prisionais conseguem obter uma boa visualização da estrutura da unidade prisional não comprometendo assim a segurança do ergástulo.

A NBR 15527/2007 fornece os requisitos para o aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis. Para o dimensionamento correto de um sistema de captação de água da chuva são necessários dados pré-definidos como, as áreas de telhados adequados a captação e o índice pluviométrico da região a ser analisada. O volume de água que pode ser captado é então calculado como as áreas dos telhados definidos (m²) multiplicado pelo índice pluviométrico da localidade (mm), conforme a Eq. (1).

Porém, para a elaboração do projeto final de captação de água da chuva, deve-se levar em consideração o consumo médio de água potável e o consumo de água captada de chuva por habitante para a correta destinação e dimensionamento das águas. No presente estudo, não foi possível definir o consumo médio de água por apenas associado aos diferentes usos da água (higiene, alimentação, consumo, limpeza etc.).

$$V = A \times IP \quad (1)$$

Onde **V** é o volume coletado de água da chuva (m³), **A** é a área de telhado (m²) e **IP** índice pluviométrico da região analisada (mm) Adaptado NBR 15527/2007.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Para os cálculos referentes ao abastecimento de água foi levantado os volumes de água consumidos nos sistemas prisionais de COPE, CPVI, SCS, CHP e CRIC nos anos de 2021 e 2022 e calculado o custo do abastecimento.

Tabela 1: Volume (m³) consumido de água e custo total (Dolar \$) para COPE, CPVI, SCS, CHP e CRIC.

ANO	COPE	CPVI	SCS	CHAP	CRIC	Total
Consumo m³						
2021	93,312	262,569	106,895	131,160	81,650	675,586
2022	116,640	242,740	105,326	125,899	86,597	677,202
Custo Total Anual (Dolar \$)						
2021	64,712.54	344,942.91	119,263.68	147,785.55	191,495.67	868,200.35
2022	94,377.72	339,999.19	136,574.39	146,209.28	221,090.28	938,250.86

Pelos valores apresentados na Tabela 1, pode-se observar que os volumes de água consumidos chegam a um total de 1,352,788 m³ (um milhão trezentos e cinquenta e dois mil setecentos e oitenta e oito) nos dois anos analisados. Assim, apenas nos anos de 2021 e 2022 o estado de Santa Catarina desembolsou \$1,806,451.21 (um milhão oitocentos e seis mil quatrocentos e cinquenta e um dólares com vinte e um centavos) para pagamento das faturas de água potável para o abastecimento dos cinco complexos penitenciários estudados.

Como a lotação dentro de um complexo penitenciário varia ao longo dos dias, utilizamos a média do número de presos alocados nos complexos penitenciários para indicar o consumo

de água por preso. Deste modo, a Tabela 2 descreve-se as médias de lotação dos complexos penitenciários e consumo médio de água por apenado por dia ao longo dos anos de 2021 e 2022.

Tabela 2: Média do número de apenados ao longo dos anos de 2021 e 2022, e consumo médio de água por apenado por dia para COPE, CPVI, SCS, CHP e CRIC.

ANO	COPE	CPVI	SCS	CHAP	CRIC
Média número de apenados					
2021	1294	2879	1731	2625	1186
2022	1287	2836	1858	2903	1235
Consumo (L)/apenado/dia					
2021	198	250	169	137	189
2022	248	234	155	119	192

Pode-se observar na Tabela 2 que a soma das médias do número de apenados dos cinco complexos penitenciários nos anos de 2021 e 2022 foram 9.716 e 10.120 respectivamente. Com os dados das Tabelas 1 pode-se inferir o consumo médio de água por apenado nos cinco complexos penitenciários.

O volume consumido em litros/apenado/dia, em todos os complexos penitenciários estudados está de acordo com o descrito por Sperling (2005), sendo esse valor duas vezes superiora um indivíduo não preso, ou seja, é um valor bastante elevado. Entretanto para o consumo descrito pela SABESP (2017) que varia de 100 a 190 L/apenado/dia, apenas SCS e CHAP, nos anos de 2021 e 2022, e CRIC no ano de 2021 atendeu a normativa da companhia paulista. No entanto deve ser considerado o racionamento de água ocorrido nos complexos do Centro-Oeste e Oeste catarinense, principalmente em SCS e CHAP em decorrência da estiagem que vem assolando as regiões desde 2019 até os dias atuais (Magnago et al., 2020; Defesa Civil, 2021; 2022). Isso explica o baixo consumo de água per capita por apenado nesses dois complexos penitenciários.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores de consumo em litros /apenado/dias de alguns autores e dos valores encontrados neste estudo. Para os valores de COPE, CPVI, SCS, CHP e CRIC foram utilizados os valores médios dos anos de 2021 e 2022.

Consumo de água (L)/apenado/dia								
Sperling (2005)	SABESP (2017)	Fernandes (2016)	Pereira (2014)	COPE	CPVI	SCS	CHAP	CRIC
200 - 500	100 - 190	542	381	223	242	162	128	191

Na Tabela 3, observa-se que os complexos Penitenciários de Santa Catarina estudados apresentam volumes de consumo diário por apenado abaixo do encontrado por Fernandes (2016) e por Pereira (2014). Isso se dá ao fato das unidades prisionais de Santa Catarina passarem por constantes reformas e melhorias em suas estruturas. Além do sério comprometimento dos policiais penais que laboram nesses estabelecimentos com o não desperdício de água, mantendo assim, um rígido controle na disciplina do ergástulo, também no controle do consumo de água pelos apenados.

Tanto Pereira (2014) e Fernandes (2016) apresentam que o alto consumo de água pelos apenados está ligado principalmente as más condições da estrutura das unidades prisionais como falta de manutenção nas redes de distribuição de água, presença de torneiras apresentando vazamentos assim como de chuveiros e equipamentos ineficientes no combate ao desperdício de água como torneiras com redução da vazão de água liberada e caixas de descargas acopladas ao invés de registros de gaveta.

Os dados de consumo de água de COPE foram constantes ao longo dos meses devido o complexo penitenciário ser atendido por ETA própria, o que não altera o tratamento de água pela estação, mantendo-se sempre com uma produção diária constante. A diferença de consumo de água entre o ano de 2021 e 2022 no COPE se dá pelo fato do aumento do número de horas de operação da ETA do complexo penitenciário, passando de 12 para 24 horas de operação a partir de outubro de 2022. Deste modo a disponibilidade de água tratada aumentou para os apenados. Na Figura 2 tem-se o consumo de água (m³) por apenado nos Municípios de CPVI, CRIC, SCS, CHAP e COPE.

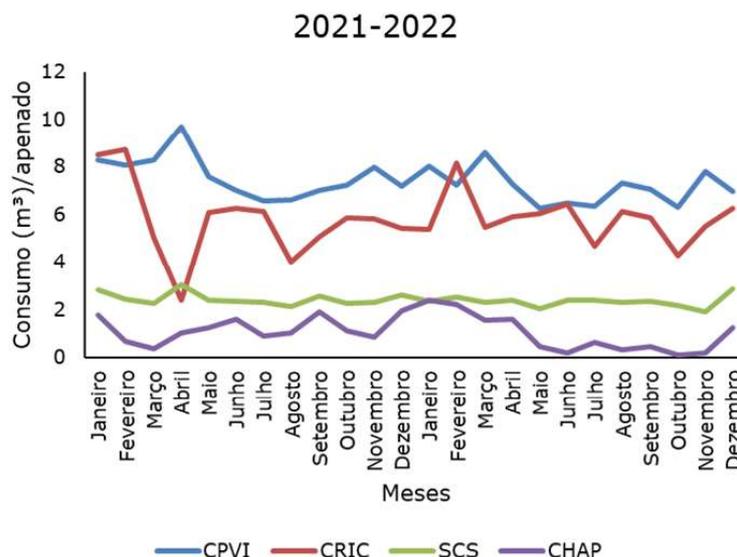


Figura 2: Consumo de água (m^3) por apenado nos Municípios de Itajaí, Criciúma, São Cristóvão do Sul (SCS) e Chapecó (CHAP).

A elevação do consumo de água nos meses de verão (janeiro a março) apresentado Figura 2 tem explicação com ao aumento da temperatura, onde pode ter uma variação de até $10^\circ C$ entre o inverno e o verão para os municípios de Chapecó (CHAP), Criciúma (CRIC) e Itajaí (CPVI). Já São Cristóvão do Sul (SCS) apresenta uma regularidade no consumo de água ao longo das estações do ano, apesar das temperaturas máximas no verão alcançar a casa do $30^\circ C$ (Silveira et al. 2012), não foi observado um aumento significativo no consumo de água pelos apenados. Isso pode ser explicado pelo fato de SCS ser um dos complexos penitenciários que mais têm presos desenvolvendo alguma atividade laboral em parceria com empresas privadas. Isso faz com que os apenados deixem suas celas pela manhã e só retornem ao final do dia, o que contribui para a diminuição do desperdício de água pelos apenados, este complexo penitenciário é referência no estado e foi matéria de jornal intitulada “Penitenciária catarinense que tem 100% dos presos trabalhando vence prêmio nacional” e pode ser lida na íntegra no link <https://www.sucessosa.com.br/noticia/penitenciaria-catarinense-que-tem-100-dos-presos-trabalhando-vence-premio-nacional>. A captação de água da chuva se apresenta como uma alternativa promissora no combate ao aumento do consumo de água nos meses mais quente do ano.

Considerando as possíveis áreas de captação de água da chuva para esses complexos penitenciários, que foram obtidas por meio de visualização e mediação utilizando-se imagens de satélite, e a precipitação média anual dos últimos cinco anos (2018 a 2022) para cada região estudada obteve-se o volume potencial de água da chuva (m^3) captado nos

telhados das unidades prisionais por ano, sendo os seguintes valores encontrados: COPE – 17.175 m³/ano; CPVI – 28.780,4 m³/ano; SCS – 42.811 m³/ano; CHAP – 58.685,1 m³/ano e CRIC – 14.616,5 m³/ano. Com os volumes potenciais de água da chuva que poderiam ser captados por ano e utilizando os volumes de água potável consumidos pelos apenados nos cinco complexos penitenciários pelo mesmo período, calculou-se o percentual de água captada sobre o total de água potável consumida anualmente (m³) apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Porcentagem de água captada em relação água consumida (%) para COPE, CPVI, SCS, SHP e CRIC.

ANO	COPE	CPVI	SCS	CHAP	CRIC
Redução de consumo (%)					
2021	18.41	10.96	40.05	44.74	17.9
2022	14.72	11.86	40.65	46.61	16.88

As porcentagens apresentadas na Tabela 4 representa a potencial economia que o estado de Santa Catarina poderia ter caso seus complexos penitenciários fossem equipados com sistemas de captação de água da chuva. Considerando que no COPE e CHAP o fornecimento de água potável se dá por meio de ETA própria, operada pelo complexo prisional, a captação de água da chuva apresenta grande potencial para redução de custos de operação das respectivas ETA's, haja vista que no COPE a captação de água bruta é por meio de captação superficial e em dias de chuva, a água bruta que chega na ETA se torna muito turva e com a cor muito escura, além de apresentar um aumento nos parâmetros sedimentos e sólidos em suspensão. Já em CHAP, a captação de água bruta se dá por meio de caxambus e poços artesianos profundos.

Apesar da água bruta em CHAP não ser um problema quanto à cor, turbidez e sólidos suspensos como no COPE, o problema enfrentado nos últimos anos em CHAP é a falta de água para tratamento na ETA do complexo penitenciário. Magnago (2021) afirma que a estiagem presente no extremo oeste de Santa Catarina nos últimos anos vem impactando diversas atividades econômicas e sociais na região. O que insere o sistema penitenciário nesse rol de atividades extremamente importante para o estado de Santa Catarina.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manutenção de um complexo penitenciário é uma atividade extremamente dispendiosa para o estado de Santa Catarina. Só no ano de 2021 e 2022, em apenas treze unidades

prisoinais e duas unidades socioeducativas agrupadas em cinco complexos penitenciários, foram gastos pouco mais de um milhão e oitocentos mil dólares apenas com o fornecimento de água aos apenados.

O consumo de água por apenado por dia está abaixo do descrito na literatura encontrada, no entanto o custo com consumo de água é elevado por complexo penitenciário, e um gasto importante para o Estado.

Também foi verificado que nos meses de verão ocorreu um aumento do consumo de água, justificado devido as elevadas temperaturas.

A captação de água da chuva e seu reuso se demonstrou uma forte aliada dentro do sistema penitenciário catarinense para a diminuição dos custos do estado no que diz respeito ao fornecimento de água aos apenados.

Os complexos penitenciários que possuem estações de tratamento de água próprias como o COPE e CHAP podem ter seu custo de fornecimento de água potável reduzido em até 16,57% e 45,68% respectivamente caso executem projetos de captação de água da chuva e destinem a água captada as suas respectivas estações de tratamento.

7 REFERENCIAS

- Abdulla, Fayez. 2020. "Rainwater Harvesting in Jordan: Potential Water Saving, Optimal Tank Sizing and Economic Analysis." *Urban Water Journal* 17(5): 446–56.
- Amos, Caleb Christian, Aatur Rahman, and John Mwangi Gathenya. 2018. "Economic Analysis of Rainwater Harvesting Systems Comparing Developing and Developed Countries: A Case Study of Australia and Kenya." *Journal of Cleaner Production* 172: 196–207.
- Asprilla Echeverría, John M. 2021. "Plan B Water Assessment: Efficiency and Circularity for Agricultural and Municipal Adaptation to Water Scarcity." *Groundwater for Sustainable Development* 14.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. 2007. *Água de Chuva - Aproveitamento de Coberturas Em Áreas Urbanas Para Fins Não Potáveis - Requisitos*. ABNT.
- Azevedo, Fernanda Araújo, and Jorge Tavares Ribeiro. 2015. *Green Schools –Conceito e Integração de Novas Tecnologias Sustentáveis Em Projetos de Edifícios Escolares*. s. n.].
- Bus, Agnieszka, and Anna Szelagowska. 2021. "Green Water from Green Roofs—the Ecological and Economic Effects." *Sustainability (Switzerland)* 13(4): 1–14.
- Campos Cardoso, Raisa Nicole, Claudio José Cavalcante Blanco, and Juliana Maia Duarte. 2020. "Technical and Financial Feasibility of Rainwater Harvesting Systems in Public Buildings in Amazon, Brazil." *Journal of Cleaner Production* 260.
- Henrique Fernandes, André. 2016. *Universidade Federal de Alfenas: A Percepção e o Comportamento do Uso Racional da Água por Pessoas em Situação de Privação de Liberdade no Presídio de Varginha*.

- João, Jair Juarez et al. 2022. "Case Study: Evaluation and Reuse of Rainwater in a Prison in Santa Catarina State, Brazil." *Journal of Agricultural Studies* 10(4): 12.
- Da Justiça, Ministério. 2011. *Diretrizes Básicas Para Arquitetura Penal*.
- Kummu, M. et al. 2016. "The World's Road to Water Scarcity: Shortage and Stress in the 20th Century and Pathways towards Sustainability." *Scientific Reports* 6.
- Magnago, Rachel Faverzani, Patrícia Medeiros, Rodrigo Paulo Raimundo, and Susana Claudete Costa. 2021. "Desastres Naturais No Estado de Santa Catarina - 1998 a 2019."
- Maykot, Jéssica Kuntz, and EneDir Ghisi. 2020. "Assessment of a Rainwater Harvesting System in a Multi-Storey Residential Building in Brazil." *Water (Switzerland)* 12(2).
- Niknam, Azar, Hasan Khademi Zare, Hassan Hosseininasab, and Ali Mostafaeipour. 2023. "Developing an LSTM Model to Forecast the Monthly Water Consumption According to the Effects of the Climatic Factors in Yazd, Iran." *Journal of Engineering Research* 11(1): 100028.
- Penserini, Luca et al. 2023. "An Integrated Human Health Risk Assessment Framework for Alkylphenols Due to Drinking Water and Crops' Food Consumption." *Chemosphere* 325: 138259.
- Pereira, Carlos Borges. 2014. *Auditoria Aos Consumos Água, Gás e Energia Elétrica No Estabelecimento Prisional de Lisboa*.
- Preeti, Preeti, and Aatur Rahman. 2021. "A Case Study on Reliability, Water Demand and Economic Analysis of Rainwater Harvesting in Australian Capital Cities." *Water (Switzerland)* 13(19).
- São Paulo, Procedimento. 2017. *Norma Técnica Sabesp NTS 181 Dimensionamento Do Ramal Predial de Água, Cavalete e Hidrômetro-Primeira Ligação*.
- da Silva, Maycon Breno Macena, Igor Antônio de Paiva Brandão, Márcia Maria Rios Ribeiro. 2022. "Viabilidade, Sazonalidade e Confiabilidade Da Captação de Água de Chuva Em Edifícios de Uma Universidade Em Campina Grande, Paraíba." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 27.
- Silveira, Marcos et al. 2012. *ATLAS CLIMÁTICO DA REGIÃO SUL DO BRASIL Estados Do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande Do Sul 2a Edição Embrapa Brasília, DF 2012 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Clima Temperado Embrapa Florestas Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. www.embrapa.br/liv*.
- Sperling, Marcos von. 2005. *Introdução À Qualidade Das Águas e Ao Tratamento de Esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais*.
- Stang, Shannon et al. 2021. "Spatially Optimized Distribution of Household Rainwater Harvesting and Greywater Recycling Systems." *Journal of Cleaner Production* 312.

CAPÍTULO 2

Potencial de captação de água da chuva no sistema penitenciário de Santa Catarina, Brasil, utilizando modelagem dinâmica de sistema.

RESUMO

O fornecimento de água é de extrema importância para a manutenção da saúde e higiene no ambiente carcerário contribuindo com o controle da disseminação de doenças. A rotina de limpeza dos ambientes carcerários consome um volume de água potável considerado gerando um custo elevado ao erário. Nesse sentido a captação de água da chuva se destaca como uma alternativa mais econômica ao fornecimento de água para a limpeza dos estabelecimentos prisionais, haja visto que a água para limpeza não precisa ser potável. Este trabalho buscou utilizar a modelagem dinâmica de sistemas como ferramenta para avaliar o potencial da utilização de água da chuva para a limpeza de cinco complexos penitenciários do estado de Santa Catarina, reduzindo os custos e o fornecimento de água potável para este fim. A modelagem dinâmica foi realizada com o auxílio do software Vensim da Ventana Systems, Inc. de Massachusetts, EUA. Para a realização das simulações foram utilizadas as médias, mínimos e máximos históricos registrados de precipitação nos últimos 30 anos em comparação com a situação atual dos complexos penitenciários. Foi observado que nos complexos penitenciários CRIC e COPE, ocorre uma redução expressiva de mais de 80% no consumo de água potável quando a precipitação mensal atinge valores máximos históricos. Considerando as médias históricas, as reduções são de 50,8% e 46,5% para CRIC e COPE, respectivamente. Contrastando, no CPVI, a redução no consumo de água potável é menor em comparação com os outros complexos, mesmo em condições de chuva máxima histórica de 194 mm, com uma redução de apenas 42,8%. Por outro lado, SCS e CHAP, com elevados índices pluviométricos e grandes áreas de telhado, conseguem, mesmo com o mínimo histórico de precipitação (115 mm para SCS e 130 mm para CHAP), captar água suficiente para atender às necessidades, gerando excedentes de 2243,6 m³ para SCS e 2709,1 m³ para CHAP. As médias e máximas históricas resultam em volumes ainda mais elevados, alcançando 4835,7 m³ em SCS e 7518,8 m³ em CHAP. Devido ao alto índice pluviométrico e as grandes áreas de telhado disponíveis para captação de chuva, a necessidade de água para limpeza pode ser suprida instalando o sistema de captação de água da chuva em 33 % da área disponível em SCS e em 44 % em CHAP.

Palavras-chave: Sistema prisional, Captação de água da chuva, Modelagem dinâmica

INTRODUÇÃO

O abastecimento de água de maneira suficiente, segura e acessível a todas as pessoas torna a sustentação da vida possível (Perveen et al. 2023; Niknam et al. 2023; Penserini et al. 2023). A água como recurso essencial a vida torna-se cada vez mais valiosa aos seres humanos e animais. Kummu et al (2016) afirma que as mudanças climáticas intensificam a escassez de água e está se tornando um problema para as futuras gerações assim como para a geração atual. Com isso, um dos grandes desafios mundiais neste século é o desenvolvimento de novas fontes de água (Ohlund et al. 2024).

Segundo Dwivedi (2022), o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável - (ODS) 6 garante o acesso universal à água potável e ao saneamento, tendo como objetivo garantir que a água e o saneamento estejam disponíveis de forma sustentável e acessível para todos e alcançando uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos em todo o planeta (Tortajada et al. 2018). De acordo com as metas do (ODS) 6, alcançar a segurança hídrica sustentável tornou-se uma medida para a redução do risco hídrico, haja vista que o risco hídrico e a segurança hídrica estão interligados – à medida que o risco hídrico aumenta, a segurança hídrica diminui (CAI et al. 2021).

O crescimento exponencial da população, a falta de planejamento dos assentamentos humanos nas áreas rurais e urbanas e a contaminação antrópica dos recursos hídricos (Murei et al. 2022), dificultam o alcance do (ODS) 6, por isso é necessário implementar novas tecnologias e conceitos para solucionarmos as ameaças relativas ao assunto (García-Avila et al. 2021; Kakoulas et al. 2022).

A tutela do meio ambiente é uma responsabilidade que abrange tanto entidades governamentais quanto não governamentais, sendo também um dever de cada cidadão. A Constituição do Brasil, no seu artigo 225, §1º, atribui ao Estado esse papel, considerando-o como o principal agente na formulação e implementação de políticas públicas ambientais (Brasil, 1988).

No âmbito das organizações públicas, e especificamente no contexto do Ministério da Justiça e Segurança Pública do Governo Federal, encontra-se o sistema prisional brasileiro. A gestão do sistema prisional federal no Brasil é responsabilidade da Secretaria Nacional de Políticas Penais (SENAPPEN), cuja função é supervisionar e regular a aplicação da Lei

de Execução Penal, bem como as normativas da Política Penitenciária Nacional, estabelecidas pelo Conselho Nacional de Política Criminal e Penitenciária (SENAPPEN, 2022).

Segundo informações do Departamento Penitenciário Nacional (DEPEN), o Brasil possui uma população carcerária de aproximadamente 671.000 detentos, alojados em instalações físicas, como penitenciárias e presídios federais e estaduais (DEPEN, 2022). Esse elevado número de encarcerados resulta em significativo consumo de recursos hídricos e geração de efluentes. No sistema penitenciário do estado de Santa Catarina o consumo de água pelos apenados em treze unidades prisionais nos anos de 2021 e 2022 foi de 1,352,788 m³ (um milhão trezentos e cinquenta e dois mil setecentos e oitenta e oito) nos dois anos analisados e com o custo total de \$1,806,451.21 (um milhão oitocentos e seis mil quatrocentos e cinquenta e um dólares com vinte e um centavos) (Brasil 2023).

Esse volume de água foi necessário para atender uma média de 9918 apenados das treze unidades prisionais estudadas nestes dois anos. Devido à grande concentração de pessoas em confinamento, o consumo de água se faz essencial para a higiene dos estabelecimentos penais assim como para a saúde dos apenados sobre custódia do estado.

O consumo de água de uma pessoa encarcerada pode ser dividido em uso nobre e uso não nobre da água sendo uso nobre, aquele uso onde se faz necessário o fornecimento de água potável como no preparo da alimentação, uso na lavanderia, no consumo diário, banho, higiene pessoal e consumo dentro da cela. Já o uso não nobre, como descarga e limpeza do ergástulo, a água pode ser fornecida por meio de outras fontes, como por exemplo água de captação da chuva. Segundo dados fornecidos pela Secretária de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa – SAP do estado de Santa Catarina, consumo de água nesses estabelecimentos prisionais varia de 128 a 242 litros/apenado/dia onde todos os usos da água pelos apenados estão inseridos nesses valores (Brasil 2023).

A limpeza dos estabelecimentos prisionais é essencial a manutenção da saúde dos funcionários, mas principalmente dos apenados, haja vista que o encarceramento e a estrutura física das unidades prisionais proporcionam a proliferação de doenças, a água consumida com a limpeza dos estabelecimentos prisionais varia de 21 a 101 litros/apenado/dia, dependendo da unidade analisada. Guo et al (2019) afirma em seu estudo que a ventilação inadequada, a superlotação e o compartilhamento de objetos pessoais contribuem para a aumento de problemas de saúde entre os apenados. Durante a

pandemia de COVID-19, ações como lavar as mãos, higiene pessoal e limpeza dos locais foram medidas essenciais ao combate da doença (Gine-Garriga et al. 2021). Segundo Hernando et al (2023) apesar das prisões serem ambientes fechados que podem espalhar doenças infecciosas, as medidas estabelecidas nas prisões espanholas permitiram conter a propagação da doença durante a pandemia de COVID-19.

Neste contexto, a captação de água da chuva para a utilização na limpeza das unidades prisionais se apresenta como uma alternativa promissora na redução do volume de água tratada utilizada e na redução de custos ao erário. Existem vários tipos de configurações de sistema de captação de água da chuva. Os sistemas de coleta de água da chuva mais utilizados são os que fornecem água para usos externos (não nobres), como irrigação de jardins, lavagem de carros e piscinas. No entanto, estes sistemas foram recentemente incorporados em sistemas de canalização interna das edificações para ampliar a variedade de utilização, tais como descargas de vasos sanitários, contribuindo assim para economia de água potável (Hdeib et al. 2023).

O sistema de captação de água da chuva é composto basicamente de três componentes principais: captação, armazenamento e tratamento (Stang et al. 2021). Quando a água coletada é destinada a utilização para uso nobre se faz necessário o tratamento da mesma com o intuito de eliminar contaminantes prejudiciais à saúde humana. A primeira chuva coletada em áreas urbanas é geralmente contaminada com poeira devido a poluição do ar, da sujeira acumulada nos telhados de captação, bem como podem estar contaminadas por fezes de animais presente nos telhados. Além disso, esta concentração de contaminantes pode promover o crescimento de espécies microbianas na água armazenada (Jamal et al. 2023).

Entretanto, a viabilidade econômica da implementação de um sistema de coleta de água da chuva está intimamente ligada ao custo da água potável (Amos et al., 2018; Abdulla, 2020; Bus and Szlagowska, 2021; Preeti and Rahman, 2021), assim como com a pluviometria disponível na região estudada. Com isso, a utilização de uma ferramenta de análise de simulação dinâmica com visualizações foi criada pela Ventana Systems, Inc. de Massachusetts, EUA, e é chamado Vensim (Jian et al. 2023). Esse software utiliza a modelagem dinâmica de sistemas. Conforme Chunga et al. (2023) os modelos dinâmicos de sistemas são um dos grupos de ferramentas utilizados no estudo do uso e planejamento múltiplo da água, permitindo a compreensão de sistemas complexos ao longo do tempo. O

modelo dinâmico de sistemas difere de outras abordagens, pois é capaz de estudar sistemas complexos utilizando ciclos de feedback, estoques e fluxos (Garcia, 2020).

O objetivo deste trabalho é utilizar a modelagem dinâmica de sistemas como ferramenta para avaliar o potencial da utilização de água da chuva para a limpeza de cinco complexos penitenciários do estado de Santa Catarina, reduzindo os custos e o fornecimento de água potável para este fim. Para realização do trabalho será elaborado um modelo e executado por meio do software Vensim, comparando os resultados atuais de consumo com os valores de precipitações mínimas, médias e máximas históricas registradas para cada região.

METODOLOGIA

Área de estudo

O estado de Santa Catarina abriga 54 unidades prisionais em suas diversas mesorregiões (Brasil, 2023). Os estudos foram conduzidos em Complexos Penitenciários nas seguintes mesorregiões: Grande Florianópolis, Vale do Itajaí, Sul, Serrana e Oeste. A Figura 01 mostra a distribuição geográfica dos municípios onde esses complexos prisionais estão situados.

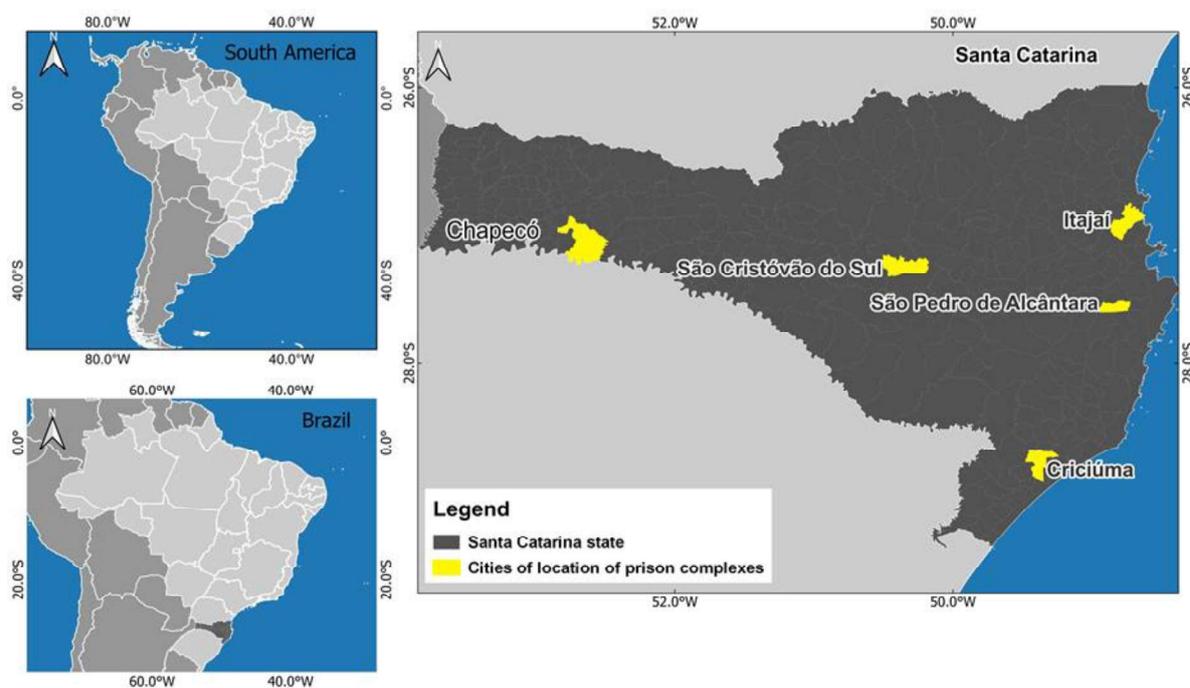


Figura 01: Municípios de localização dos Complexos Prisionais.

Para simplificar a compreensão será adotada a seguinte nomenclatura para os complexos penitenciários, sendo Complexo Penitenciário do Estado – COPE; Complexo Penitenciário de Itajaí – CPVI; Complexo Penitenciário de São Cristóvão do Sul – SCS; Complexo Penitenciário de Criciúma – CRIC e Complexo Penitenciário de Chapecó – CHAP.

COPE (Complexo Penitenciário do Estado) - Localizado em São Pedro de Alcântara, na Grande Florianópolis, com capacidade para 1.300 detentos em regime fechado. Possui instalações próprias de tratamento de esgoto (ETE) e tratamento de água (ETA). Sua posição geográfica está definida pelas coordenadas UTM: 721763.57 E; 6947220.63 S.

CRIC (Complexo Penitenciário de Criciúma) - Situado em Criciúma, compreende a Penitenciária Sul e a Penitenciária Feminina. Com capacidade total de 1.122 vagas, possui uma ETE própria e é abastecido pela Companhia Catarinense de Água e Esgoto (CASAN). O complexo penitenciário está localizado pelas coordenadas UTM 659527.97 E; 6807773.96 S.

CPVI (Complexo Penitenciário do Vale do Itajaí) - Localizado em Itajaí, coordenadas UTM 728702.13 E; 7014649.40 S, com capacidade para 2.790 detentos distribuídos em diversas instalações, incluindo Penitenciária, Presídio Regional e Presídio Feminino. Possui uma ETE própria e é abastecido pelo Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura (SEMASA).

SCS (Complexo Penitenciário de São Cristóvão do Sul) - Situado em São Cristóvão do Sul, coordenadas UTM 556136.33 E; 6983903.30 S é composto por três unidades prisionais e tem capacidade para 1.756 vagas. Conta com ETE própria e abastecimento de água pela CASAN e dois poços internos.

CHAP (Complexo Penitenciário de Chapecó) - O maior complexo prisional do estado, localizado em Chapecó, possui 2.526 vagas distribuídas em quatro unidades prisionais e uma unidade socioeducativa. Recebe água da CASAN, captação de água subterrânea e superficial, todas tratadas em uma ETA própria, e tem uma ETE própria para o esgoto. O complexo penitenciário está localizado pelas coordenadas UTM 334152.44E; 7000397.98 S.

Levantamento dos dados

Os dados referentes ao número de vagas, número de unidades prisionais, número de pessoas sob a custódia do estado foram obtidos junto a Secretaria de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa – SAP por meio de pesquisa em software

próprio de gestão penitenciária do Estado de Santa Catarina, intitulado de IPEN – Sistema de Informações Penitenciárias.

Já os dados referentes às precipitações ocorridas nas localidades alvo de estudos, foram obtidos por consulta ao site do Instituto de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Pecuária – INMET.

O consumo de água nos complexos penitenciários foi obtido por meio das faturas mensais dos anos de 2021 e 2022 assim como os valores gastos pelo estado de Santa Catarina para fornecimento de água aos internos.

Modelagem

Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada uma modelagem e análise do modelo por meio do software VENSIM da Ventana Systems Inc. Com o uso do software é possível a realização de simulações dinâmicas. A simulação de sistemas dinâmicos é uma metodologia utilizada para transformar fenômenos reais em modelos mais palpáveis, cujos sistemas mudarão ao longo do tempo, sendo possível prever diferentes cenários. (Hadiwibowo, et al. 2021)

A documentação total da modelagem desenvolvida e utilizada (informações necessárias para replicação da modelagem) encontra – se no APÊNDICE 1.

RESULTADOS OBTIDOS

Por possuírem grandes áreas de telhado, os complexos penitenciários tornam-se uma excelente opção para captação de água da chuva e seu reuso. Entretanto o investimento de recursos públicos deve ser destinado, sempre, observando os princípios constitucionais da eficiência e economicidade (Brasil, 1988). Para auxiliar no cumprimento destes princípios o uso da modelagem dinâmica de sistemas se apresenta como uma ferramenta com alto potencial podendo subsidiar gestores e agentes públicos na tomada de decisões e formulações de políticas públicas.

Considerando as áreas possíveis de captação de água da chuva dos complexos penitenciários, a precipitação na região estudada, o número de internos alocados nos estabelecimentos prisionais e o consumo per capita de água criou-se um modelo para estimar a economia de água potável que atualmente é destinada a limpeza dos complexos penitenciários caso seja instalado um sistema de captação e reutilização de água da chuva. A Figura 02 demonstra o modelo desenvolvido.

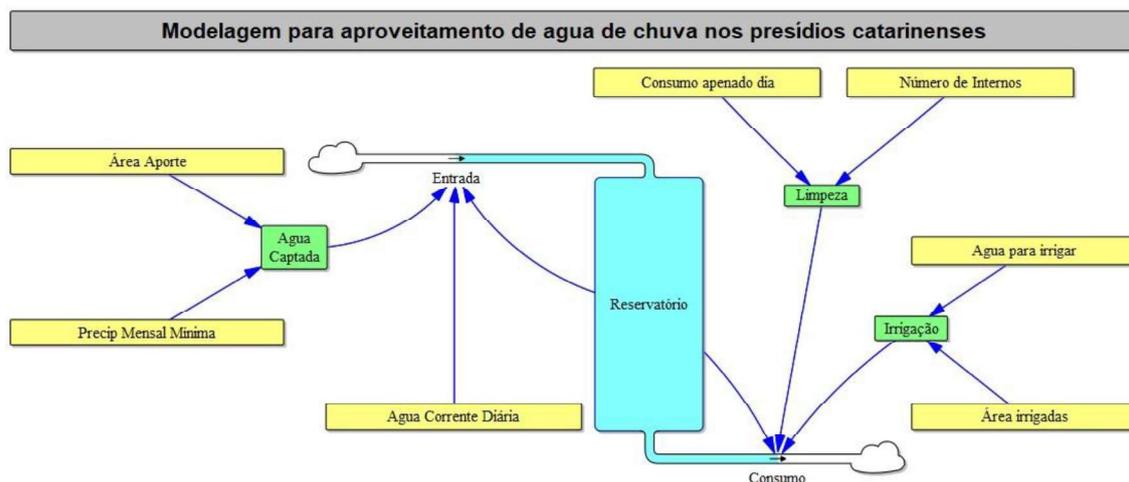


Figura 02: Modelagem para aproveitamento de água da chuva em unidades prisionais de Santa Catarina.

Atualmente, os complexos penitenciários estudados não possuem um sistema de captação e reuso de água da chuva instalado. Com isso, toda água destinada a limpeza utilizada dentro dos complexos é proveniente das concessionárias de água ou das estações de tratamento de água dos próprios complexos.

A estimativa do consumo de água potável gasto com limpeza foi obtida por meio da diferença entre o que é utilizado com o preparo da alimentação, banho, descargas, consumo, lavanderia e higiene pessoal dos apenados em relação ao consumo per capita de água por apenado em cada complexo penitenciário. Essa diferença foi definida como sendo o volume de água destinado a limpeza.

Para obtenção dos valores do consumo de água com o preparo da alimentação do apenados foi observado dois valores na literatura onde Silva Filho (1996) apresentou um valor de 28 litros por refeição preparada em um restaurante popular e De Souza et al. (2012) apresentou um consumo de 11 litros por refeição. O valor superior de Silva Filho pode ser justificado pois é considerado o uso de chuveiros pelos funcionários da cozinha. No caso dos complexos penitenciários, foi utilizado o valor de 40 litros de água por apenado por dia para o preparo da alimentação.

O consumo de água para banho foi determinado considerando um período médio de banho de 7,5 minutos com um gasto de 7 litros por minuto, totalizando um gasto de água para banho por apenado de 52 litros/dia. Além do uso da água para o banho, foi considerado o consumo de água para o uso do vaso sanitário. Esse cálculo foi realizado considerando 6 descargas por dia com um volume de 6 litros utilizados por descarga, totalizando um consumo de 36 litros diário por apenado. O volume de água utilizada para lavar as roupas

dos internos foi estimado pela média do volume consumido de água pelos internos das unidades que possuem lavanderia acrescido 2,35 litros de água, totalizando 6 litros. Ainda foi considerado 2 litros de água para consumo por apenado por dia, e 5 litros de água para higiene pessoal (lavar as mãos e escovar os dentes). A Tabela 01 apresenta os valores dos tipos de consumo de água pelos internos.

Tabela 01: Tipos de consumo de água pelos internos.

Tipos de consumo de água			
Nobre		Não Nobre	
cozinha = 40		vaso = 42	
banho = 52			
pia (cela) = 3			
Lavanderia = 6			
Consumo = 2			
Esc. Dentes = 2			
Total	105	36	141

O consumo de água por apenado por dia foi determinado por meio da média do volume de água consumida nos complexos penitenciários dividida pela média do número de apenados residentes nos complexos penitenciários. Para realização dos cálculos foram utilizados os valores dos volumes de água consumidos nos anos de 2021 e 2022 assim como os valores dos números de apenados no mesmo período.

Utilizando a modelagem dinâmica apresentada na Figura 02, foi definido que a área de aporte fosse a área total disponível para implantação do sistema de coleta da água da chuva. O número de apenados nos complexos penitenciários e o volume de água destinado a limpeza estão demonstrados na Tabela 02 juntamente com as áreas disponíveis de telhado utilizadas na modelagem. Cabe ressaltar que para CHAP, o volume de água per capita destinado a limpeza foi obtido por meio da média entre SCS, COPE, CPVI e CRIC pois o consumo de água por apenado foi reduzido nos anos de 2021 e 2022 devido a dificuldades de abastecimento de água no complexo penitenciário.

Tabela 02: Dados iniciais utilizados na modelagem dinâmica.

Complexo Penitenciário	Área disponível de telhado (m²)	Nº de apenados	Água destinada a limpeza (l/apenado/dia)
CHAP	38200	2800	26
COPE	9600	1300	82
CPVI	19400	2900	101
CRIC	9400	1200	50

Ao realizar a modelagem, buscou – se obter valores de volumes de água destinado a limpeza próximos de zero, pois o intuito é observar como a captação de água da chuva pode contribuir para a redução da utilização de água potável fornecida pela concessionária. Aplicando o modelo desenvolvido para todos os complexos penitenciários foi possível simular o volume de água excedente que pode ser destinado a limpeza, reduzindo assim o desperdício e desonerando o erário do pagamento de água potável para este fim.

Iniciando a modelagem com os valores da área de aporte e da precipitação zerados obteve – se o excedente de água destinado a limpeza ao final de trinta dias. Quando consideramos um sistema de captação de água da chuva e determinadas precipitações, nesse caso, foi utilizada a média histórica, o mínimo histórico e o máximo histórico registrados para a região nos últimos trinta anos, obtemos uma redução nos volumes de água utilizados para limpeza.

Na Figura 03 podemos observar o excedente de água em quatro cenários analisados para CRIC.

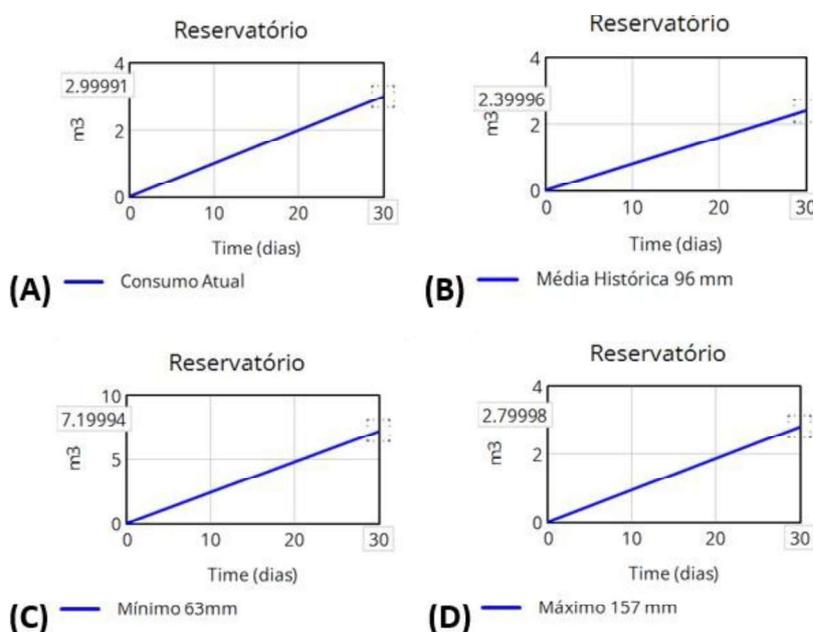


Figura 03: Demonstração do excedente de água no reservatório disponível para limpeza para no Complexo Penitenciário de Criciúma – CRIC, onde, (A) consumo atual, (B) Média Histórica, (C) Mínimo Histórico registrado e (D) Máximo Histórico Registrado.

Com esses resultados foi possível determinar a redução do volume de água atualmente utilizado em CRIC para cada cenário. A Figura 04 demonstra a redução observada.

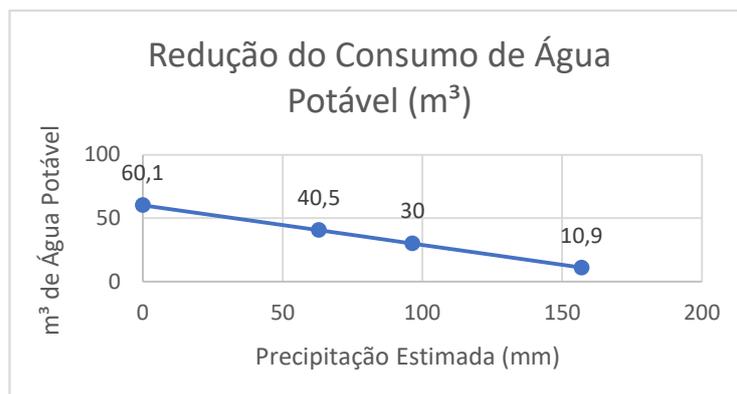


Figura 04: Redução do consumo de água potável em CRIC.

O mesmo procedimento foi realizado para os demais complexos penitenciários estudados e os gráficos do excedente de água disponível para limpeza para os complexos penitenciários CPVI, COPE, SCS e CHAP podem ser observados nas Figura 05, Figura 06, Figura 07 e Figura 08 respectivamente.

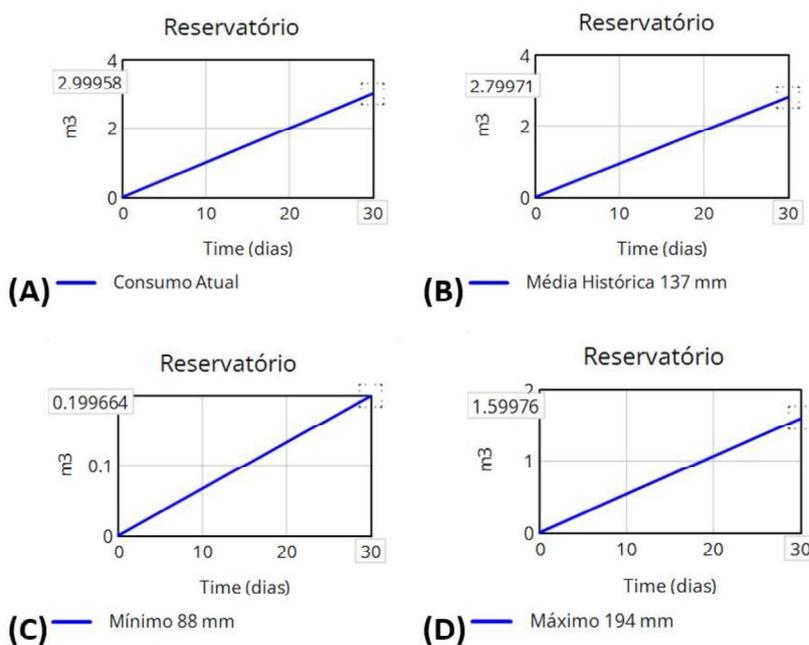


Figura 05: Demonstração do excedente de água no reservatório disponível para limpeza para no Complexo Penitenciário de Criciúma – CPVI, onde, **(A)** consumo atual, **(B)** Média Histórica, **(C)** Mínimo Histórico registrado e **(D)** Máximo Histórico Registrado.

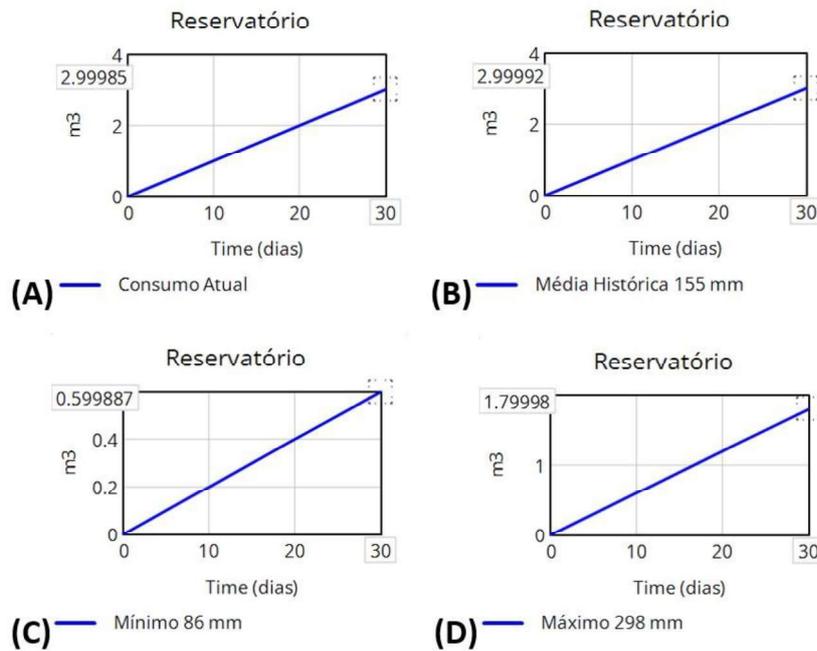


Figura 06: Demonstração do excedente de água no reservatório disponível para limpeza para no Complexo Penitenciário do Estado – COPE, onde, (A) consumo atual, (B) Média Histórica, (C) Mínimo Histórico registrado e (D) Máximo Histórico Registrado.

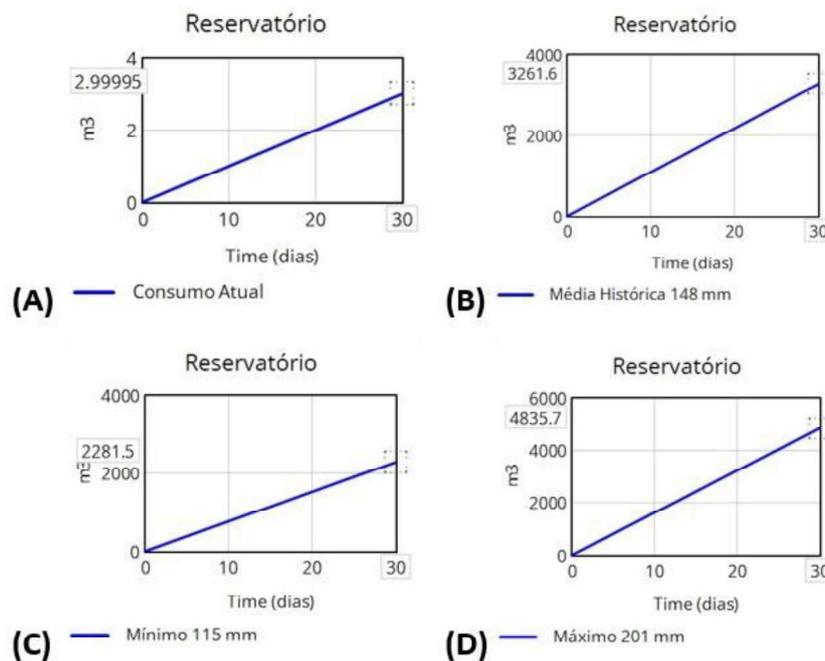


Figura 07: Demonstração do excedente de água no reservatório disponível para limpeza para no Complexo Penitenciário de São Cristóvão do Sul – SCS, onde, (A) consumo atual, (B) Média Histórica, (C) Mínimo Histórico registrado e (D) Máximo Histórico Registrado.

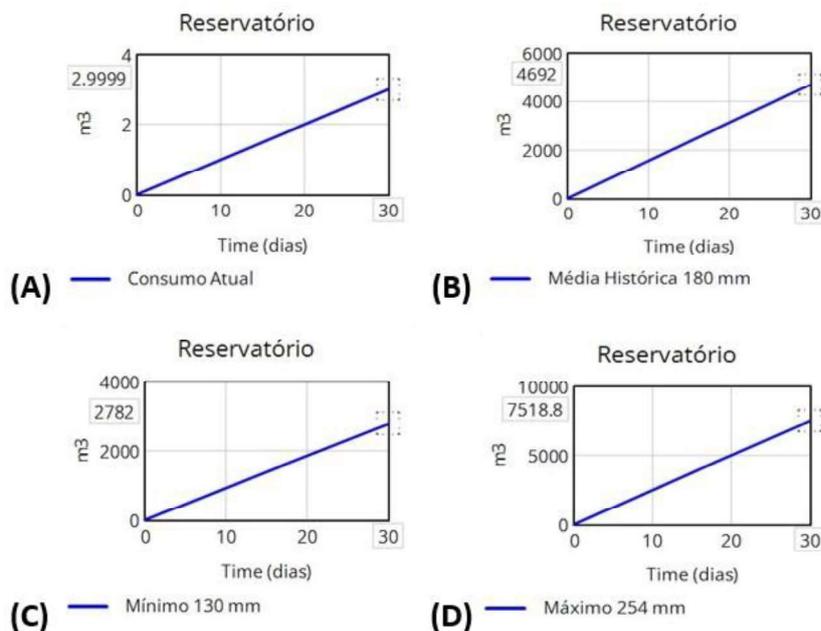


Figura 08: Demonstração do excedente de água no reservatório disponível para limpeza para no Complexo Penitenciário de Chapecó – CHAP, onde, (A) consumo atual, (B) Média Histórica, (C) Mínimo Histórico registrado e (D) Máximo Histórico Registrado.

Do mesmo modo, os gráficos de redução do consumo de água potável para os complexos penitenciários CPVI, COPE, SCS e CHAP estão demonstrados na nas Figura 09, Figura 10, Figura 11 e Figura 12 respectivamente.

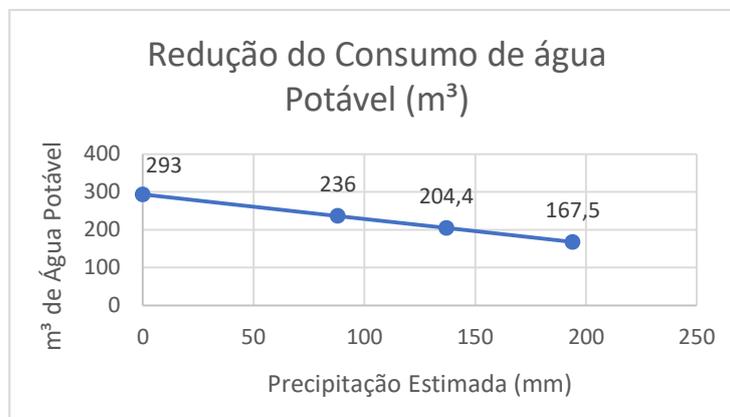


Figura 09: Redução do consumo de água potável em CPVI.

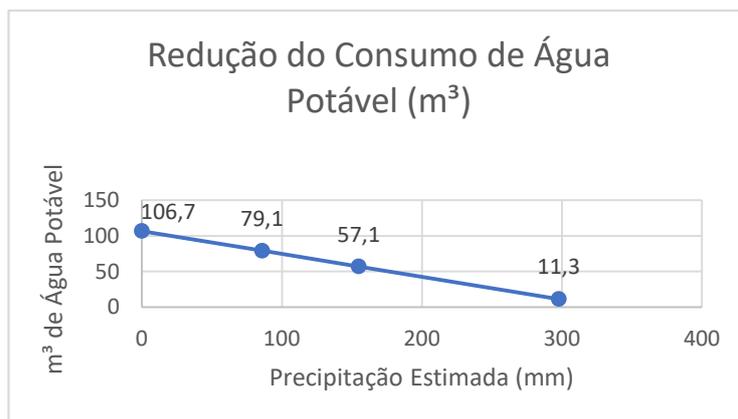


Figura 10: Redução do consumo de água potável em COPE.

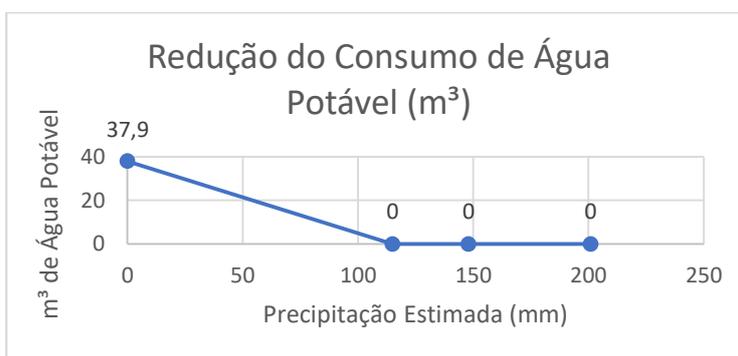


Figura 11: Redução do consumo de água potável em SCS.

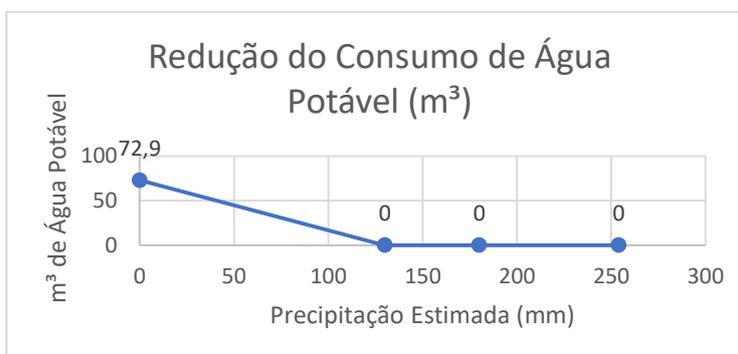


Figura 12: Redução do consumo de água potável em CHAP.

A Tabela 03 apresenta a redução do consumo nos complexos penitenciários ao se utilizar a captação de água da chuva para armazenamento de água destinada a limpeza.

Tabela 03: Redução do consumo de água potável.

	Precipitação (mm)	Concessionária (m³)	Redução do Consumo (%)
CRIC			
Consumo Atual	0	61	0
Mín. Hist.	63	40,5	33,6
Méd. Hist.	96,5	30	50,8
Máx. Hist.	157	10,9	82,1
CPVI			
Consumo Atual	0	293	0
Mín. Hist.	88	236	19,5
Méd. Hist.	137	204,4	30,2
Máx. Hist.	194	167,5	42,8
COPE			
Consumo Atual	0	106,7	0
Mín. Hist.	86	79,1	25,9
Méd. Hist.	155	57,1	46,5
Máx. Hist.	298	11,3	89,4
SCS			
Consumo Atual	0	37,9	0
Mín. Hist.	115	0	100
Méd. Hist.	148	0	100
Máx. Hist.	201	0	100
CHAP			
Consumo Atual	0	72,9	0
Mín. Hist.	130	0	100
Méd. Hist.	180	0	100
Máx. Hist.	254	0	100

Observa – se que em CRIC e no COPE há uma redução de mais de 80% caso a precipitação mensal chegue nos valores máximos registrados na série histórica. O que não é comum de acontecer. Mesmo considerando as médias históricas observa – se que a redução no consumo de água potável é de 50,8 % e 46,5% respectivamente.

No CPVI é observado uma redução no consumo de água potável menor em relação aos demais complexos penitenciários analisados. Mesmo que chova o máximo histórico registrado de 194 mm a redução no consumo de água potável para limpeza seria apenas de 42,8%. Isso não se dá em razão dos valores de precipitação serem menores nessa região, mas sim pelo fato do consumo per capita em CPVI ser o maior entre os complexos penitenciários analisados, superando em 79,20% SCS e 74,20% CHAP. O auto consumo per capita também é justificável pelo complexo apresentar a maior taxa de lotação de presos com 2900 apenados e a terceira maior área de captação de água da chuva.

SCS e CHAP apresentam características peculiares devido ao alto índice pluviométrico e as grandes áreas de telhado disponíveis dentro dos complexos penitenciários. Para suprir a

necessidade de água da chuva utilizando toda área disponível de telhados nesses complexos basta apenas que chova o mínimo histórico registrado em cada região, sendo 115 mm para SCS e 130 mm para CHAP e ainda assim haverá um excedente de 2243,6 m³ para SCS e 2709,1 m³ para CHAP. Considerando a pluviometria média e máxima histórica registrada para esses dois complexos, obtém-se volumes de água captado muito elevados, chegando a 4835,7 m³ em SCS e 7518,8 m³ em CHAP conforme demonstrado na Figura 07 e Figura 08.

Com base nessas informações, foi realizada uma nova simulação com a modelagem dinâmica apresentada onde foi reduzida as áreas de captação de água da chuva em SCS e CHAP. Do mesmo modo que foi realizado a simulação com as áreas totais disponíveis nos ergástulos, a simulação realizada com redução das áreas de captação da água da chuva também tenderam a valores próximos de zero. Deste modo demonstra-se que mesmo reduzindo as áreas de captação de água da chuva, ainda assim é suprido o fornecimento de água destinado a limpeza. A Figura 13 apresenta os resultados obtidos para SCS e a Figura 14 apresenta os resultados de CHAP.

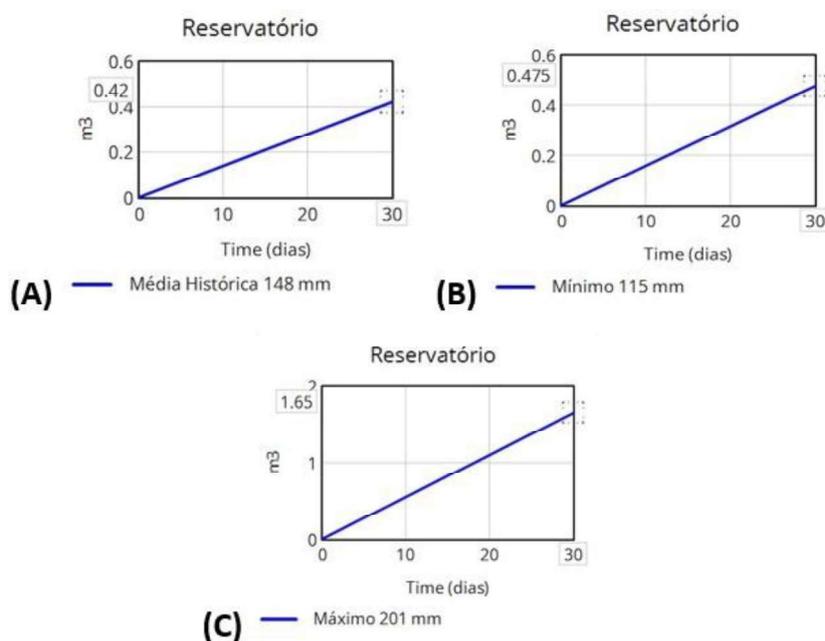


Figura 13: Demonstração do excedente de água no reservatório disponível para limpeza para no Complexo Penitenciário de São Cristóvão do Sul – SCS com redução das áreas de captação de água, onde, (A) Média Histórica, (B) Mínimo Histórico, (C) Máximo Histórico Registrado.

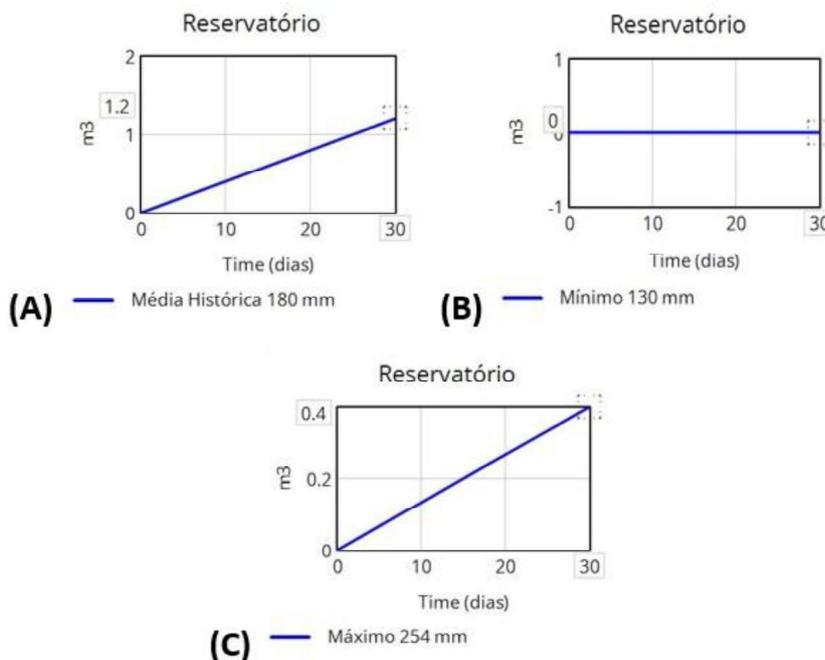


Figura 14: Demonstração do excedente de água no reservatório disponível para limpeza para no Complexo Penitenciário de Chapecó – CHAP com redução das áreas de captação de água, onde, (A) Média Histórica, (B) Mínimo Histórico, (C) Máximo Histórico Registrado.

A Tabela 04 apresenta os valores em m^2 de área de captação de água da chuva com as respectivas pluviometrias registradas para SCS e CHAP.

Tabela 04: Redução da área de captação em relação ao aumento da precipitação.

SCS		CHAP	
Área de Captação de Água da Chuva (m^2)	Precipitação (mm)	Área de Captação de Água da Chuva (m^2)	Precipitação (mm)
29700	0	38200	0
9856	115	16800	130
7665	148	12140	180
5650	201	8600	254

Com base nos valores apresentados na Tabela 04 percebe – se que para suprir a necessidade de água para limpeza é necessário apenas a instalação do sistema de captação de água da chuva em 33 % da área disponível em SCS e em 44 % em CHAP. Deste modo há uma economia significativa aos cofres públicos no que tange a instalação do sistema de captação de água da chuva. Por outro lado, em SCS e CHAP existem áreas de cultivo de hortifrutis que são comercializadas pelos complexos penitenciários, gerando trabalho e renda aos apenas destes estabelecimentos. Para que haja produção agrícola é necessário que haja um sistema de irrigação para suprir a demanda de água pelas plantas. SCS e CHAP são complexos que possuem um açude onde a água da chuva já é armazenada e bombeada para as áreas de cultivo quando necessário.

Deste modo, a instalação de um sistema de captação de água da chuva em toda área disponível de telhado é justificável e viável. Principalmente em CHAP onde o ergástulo possui uma estação de tratamento de água – ETA própria e parte da água fornecida aos apenados é proveniente desta ETA. Assim, CHAP possuiria uma maior reserva de água, tanto para utilização na lavoura quanto para tratamento e fornecimento aos apenados, diminuindo o risco de falta de água em uma eventual estiagem ou deficiência de fornecimento pela concessionária.

CONCLUSÕES

A modelagem dinâmica de sistemas é uma ferramenta muito útil para auxiliar gestores públicos na tomada de decisões, especialmente porque muitas dessas decisões tem repercussões de médio e longo prazo. No estudo apresentado se observa que investimentos públicos em sistemas de coleta e reuso de água da chuva são extremamente viáveis de serem adquiridos e instalados do ponto de vista econômico e ambiental, haja vista que o gasto do estado de Santa Catarina nos anos de 2021 e 2022 com o fornecimento de água para os complexos penitenciários analisados ultrapassou a casa de US\$ 1.800.000,00.

Os complexos CRIC e COPE foram os complexos penitenciários mais promissores para a instalação de sistemas de coleta de água da chuva, com 50,8% e 46,5% de economia de água potável respectivamente, caso a precipitação fique em torno da média histórica registrada e podem chegar a mais de 82% de economia caso a precipitação chegue próximo ao máximo registrado para as regiões. No caso do CPVI, que possui o maior consumo de água per capita, se a precipitação se manter próxima do mínimo histórico registrado de 88mm, obtém – se uma economia de água tratada de 19,5% ao mês. A economia média esperada é 30,2% se considerarmos a média histórica registrada.

Os complexos SCS e CHAP, ao utilizarem toda a área disponível para captação de água da chuva, com os mínimos históricos registrados de pluviometria, obtém - se um excedente de 2281,5m³ e 2782m³ respectivamente de água coletada disponível para limpeza e caso chova a média mensal nessas regiões, os excedentes de água coletada podem chegar a 3261,5m³ em SCS e 4692m³ em CHAP. Esses milhões de litros de água coletados podem abastecer os açudes presentes em ambos os complexos penitenciários e podem ser utilizados para a irrigação das lavouras presentes nos ergástulos, reduzindo assim o investimento em caixas d'água para armazenamento da água coletada.

Outro ponto que faz com que CHAP seja uma excelente opção para a instalação de um sistema de coleta de água da chuva é o fato de que existe uma ETA própria e operada pelo ergástulo, que fornece parte da água potável aos apenados e devido a problemas de abastecimento de água pela concessionária nos últimos anos a coleta, armazenamento o tratamento de água realizado dentro do complexo penitenciário minimizaria a dependência de fornecedores externos.

Entretanto, por possuírem as maiores áreas de telhado disponíveis para coleta de água da chuva, onde SCS possui 29.700m² e CHAP 38.200m², o investimento inicial pode se tornar um pouco elevado. Considerando os custos de implantação e os altos índices pluviométricos dessas regiões, observou que chovendo apenas o mínimo histórico registrado, para suprir a necessidade de água para limpeza desses complexos penitenciários, bastaria apenas 33% da área disponível para captação em SCS e 44% em CHAP.

REFERENCIAS

- Abdulla, F. (2020). Rainwater harvesting in Jordan: potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water Journal*, 17(5), 446-456.
- Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (2018). Economic analysis of rainwater harvesting systems comparing developing and developed countries: A case study of Australia and Kenya. *Journal of cleaner production*, 172, 196-207.
- Brasil. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, [2016]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 10 nov. 2023.
- Brasil. Santa Catarina. Secretaria de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa, 2023. Acesso em: 1 fev. 2023.
- Bus, A., & Szelągowska, A. (2021). Green water from green roofs—the ecological and economic effects. *Sustainability*, 13(4), 2403.
- Cai, J., Zhao, D., & Varis, O. (2021). Match words with deeds: Curbing water risk with the Sustainable Development Goal 6 index. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128509.
- Chunga, B. A., Marx, W., Cai, X., de Clercq, W., Watson, A., & Malota, M. (2023). Water allocation using system dynamic modelling in the aquaculture integrated with small-scale irrigation systems in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103355.
- DEPEN – Departamento Penitenciário Nacional. (2022). Modelo de gestão da política prisional: Caderno II: arquitetura organizacional e funcionalidades. Brasil: Departamento Penitenciário Nacional, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, Conselho Nacional de Justiça.
- de Souza, D. P., Santos, R. K., & Santos, R. F. (2012). Estimativa do consumo de água em restaurantes na cidade de Cascavel-PR. *Acta Iguazu*, 1(3), 50-63.
- Dwivedi, P. P., & Sharma, D. K. (2022). Application of Shannon Entropy and COCOSO techniques to analyze performance of sustainable development goals: The case of the Indian Union Territories. *Results in Engineering*, 14, 100416.

García-Ávila, F., Valdiviezo-Gonzales, L., Iglesias-Abad, S., Gutiérrez-Ortega, H., Cadme-Galabay, M., Donoso-Moscoso, S., & Zhindón-Arévalo, C. (2021). Opportunities for improvement in a potabilization plant based on cleaner production: Experimental and theoretical investigations. *Results in Engineering*, *11*, 100274.

García, J. M. (2023). *Theory and practical exercises of system dynamics: modeling and simulation with Vensim PLE. Preface John Sterman*. Juan Martin Garcia.

Giné-Garriga, R., Delepiere, A., Ward, R., Alvarez-Sala, J., Alvarez-Murillo, I., Mariezcurrena, V., ... & Jiménez, A. (2021). COVID-19 water, sanitation, and hygiene response: Review of measures and initiatives adopted by governments, regulators, utilities, and other stakeholders in 84 countries. *Science of the Total Environment*, *795*, 148789.

Guo, W., Cronk, R., Scherer, E., Oommen, R., Brogan, J., Sarr, M., & Bartram, J. (2019). A systematic scoping review of environmental health conditions in penal institutions. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, *222*(5), 790-803.

Hadiwibowo, J. C., Halim, S., Yahya, B. N., Agustin, K., & Sahputra, I. H. (2021, April). A policy strategy evaluation for covid-19 pandemic in the city of surabaya using vensim ventana dynamic system simulation. In *2021 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT)* (pp. 215-221). IEEE.

Hdeib, R., & Aouad, M. (2023). Rainwater harvesting systems: An urban flood risk mitigation measure in arid areas. *Water Science and Engineering*.

Hernando, V., Vázquez, I., Díaz, A., Gómez-Pintado, P., Martínez-Aznar, C., & Acín, E. (2023). COVID-19 pandemic in prisons in Spain: characteristics of cases and implemented control measures, March 2020–June 2022. *Public health*, *218*, 45-52.

Inmet. Site do Inmet, 2023. Gráficos Climatológicos. Disponível em <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377> . Acesso em 17 jun. 2023.

Inmet. Site do Inmet, 2023. Gráficos Climatológicos. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/servicos/gr%C3%A1ficos-climatol%C3%B3gicos> . Acesso em 17 jun. 2023.

Jamal, A. S. I. M., Tarek, Y. A., Siddique, M. A. B., Shaikh, M. A. A., Debnath, S. C., Uddin, M. R., ... & Sultana, S. (2023). Development of a fabricated first-flush rainwater harvested technology to meet up the freshwater scarcity in a South Asian megacity, Dhaka, Bangladesh. *Heliyon*, *9*(1).

Jian, Z., Abd Rahman, N. F., & Ong, J. (2023). Modelling the Carrying Capacity of Water Resources for Sustainable Water Ecology Using Vensim. *International Journal of Professional Business Review*, *8*(9), e03846-e03846.

Kakoulas, D. A., Golfopoulos, S. K., Koumparou, D., & Alexakis, D. E. (2022). The effectiveness of rainwater harvesting infrastructure in a Mediterranean island. *Water*, *14*(5), 716.

Kummu, M., Guillaume, J. H., de Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., ... & Ward, P. J. (2016). The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific reports*, *6*(1), 38495.

Murei, A., Mogane, B., Mothiba, D. P., Mochware, O. T. W., Sekgobela, J. M., Mudau, M., ... & Momba, M. N. B. (2022). Barriers to Water and Sanitation Safety Plans in Rural Areas of South Africa—A Case Study in the Vhembe District, Limpopo Province. *Water*, *14*(8), 1244.

Niknam, A., Zare, H. K., Hosseininasab, H., & Mostafaeipour, A. (2023). Developing an LSTM model to forecast the monthly water consumption according to the effects of the climatic factors in Yazd, Iran. *Journal of Engineering Research*, *11*(1), 100028.

Ohlund, R. J., Dahdah, B. H., Guillen, G. R., & Childress, A. E. (2024). Augmenting ocean water desalination with potable reuse: Concept feasibility in terms of cost and environmental impacts. *Desalination*, 569, 116941.

Perveen, S. (2023). Drinking water quality monitoring, assessment and management in Pakistan: A review. *Heliyon*.

Penserini, L., Cantoni, B., Gabrielli, M., Sezenna, E., Saponaro, S., & Antonelli, M. (2023). An integrated human health risk assessment framework for alkylphenols due to drinking water and crops' food consumption. *Chemosphere*, 325, 138259.

Preeti, P., & Rahman, A. (2021). A case study on reliability, water demand and economic analysis of rainwater harvesting in Australian capital cities. *Water*, 13(19), 2606.

SENAPPEN – Secretaria Nacional de Políticas Penais. (2022). Recuperado em 27 de maio de 2023 de <https://www.gov.br/senappen/pt-br/aceso-a-informacao/institucional>.

Silva Filho, A. R. A. D. (1996). Manual básico para planejamento e projeto de restaurantes e cozinhas industriais. In *Manual básico para planejamento e projeto de restaurantes e cozinhas industriais* (pp. 232-232).

Stang, S., Khalkhali, M., Petrik, M., Palace, M., Lu, Z., & Mo, W. (2021). Spatially optimized distribution of household rainwater harvesting and greywater recycling systems. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127736.

Tortajada, C., & Biswas, A. K. (2018). Achieving universal access to clean water and sanitation in an era of water scarcity: strengthening contributions from academia. *Current opinion in environmental sustainability*, 34, 21-25.

APÊNDICE 1

- (01) $\text{Água Captada} = \text{Área Aporte} * (\text{Precip. Mensal Mínima} / 30) * 0.001$
 Units: m3 [0,80000,1]
 Água captada pelos telhados com chuva trimestral média da série oficial do INMET 30 anos.
- (02) $\text{Água Corrente Diária} = 0$
 Units: m3 [0,500,1]
 Adicional de água corrente (Empresa), em m3 por dia, necessários para equilibrar o consumo quando a chuva ou o consumo não seja suficiente
- (03) $\text{Água para irrigar} = 0$
 Units: m3/Ha [0,1000,1]
 m3 de água por cada hectare por ciclo trimestral a ser irrigada (valor médio trimestral) (4 ciclos no ano)
- (04) $\text{Área Aporte} = 9400$
 Units: m2 [5000,40000,10]
 Área de aporte dos telhados economicamente viáveis pelo tamanho e pela localização no complexo penitenciário.
- (05) $\text{Área irrigadas} = 0$
 Units: Ha [0,20,1]
 Área para irrigar com água de chuva
- (06) $\text{Consumo} = \text{Reservatório} - \text{Limpeza} - \text{Irrigação}$
 Units: m3
 A saída é conteúdo da caixa, em cada dia, menos os consumos/ usos
- (07) $\text{Consumo apenado dia} = 50$
 Units: litros/pessoa [10,150,1]
 Litros de água para limpeza por apenado por dia (obtido por diferença dos consumos conhecidos)
- (08) $\text{Entrada} = \text{Reservatório} + \text{Água Captada} + \text{Água Corrente Diária}$
 Units: litros
 A entrada é a água de chuva recuperada e a água corrente, se necessário.
- (09) $\text{FINAL TIME} = 30$
 Units: dias
 The final time for the simulation.
- (10) $\text{INITIAL TIME} = 0$
 Units: dias
 The initial time for the simulation.
- (11) $\text{Irrigação} = (-1) * \text{Água para irrigar} * \text{Área irrigadas}$
 Units: m3 [?,?,1]

Água em m3 usados para irrigação por Ha de culturas/jardins

- (12) $\text{Limpeza} = (-1) * \text{Consumo apenado dia} * \text{Número de Internos} * 0.001$
 Units: m3 [?,?,10]
 Água em metros cúbicos por mês usada para limpeza (valores devem ser negativos)
- (13) $\text{Número de Internos} = 1200$
 Units: pessoas [500,4000,1]
 Número de pessoas internas
- (14) $\text{Precip. Mensal Mínima} = 0$
 Units: mm [0,1200,10]
 Precipitação mensal média mínima série temporal INMET. Mês com menor acúmulo médio na região em mm
- (15) $\text{Reservatório} = \text{INTEG} (\text{Entrada} - \text{Consumo}, 0)$
 Units: m3 [0,500000,5]
 Caixa de água para recuperação de água de chuva em m3 iniciando zerada.
- (16) $\text{SAVEPER} = \text{TIME STEP}$
 Units: dias [0,?]
 The frequency with which output is stored.
- (17) $\text{TIME STEP} = 1$
 Units: dias [0,?]
 The time step for the simulation.

CAPÍTULO 3

Case Study: Evaluation and Reuse of Rainwater in a Prison in Santa Catarina State, Brazil

Jair Juarez João^a, Matheus Frederico Ferreira Henckmaier, Gustavo Reche Santa Rosa, Amanda Schueng Lima, Vitória de Godoy Saciloto

^a Postgraduate Program in Environmental Sciences, University of Southern Santa Catarina, Tubarão, Santa Catarina, Brazil. Email: jairjoao05@gmail.com

Abstract

The capture and reuse of rainwater is a viable alternative in regions where water is scarce or in places where water consumption is high. However, the economic viability of the implementation of an appropriate system is reduced by the need to install pumps, filter pipes and filters. This case study was focused on evaluating the potential for the harvesting and reuse of rainwater in a prison in Santa Catarina State, Brazil. The experiment was carried out at Tubarão prison, where three sampling points were strategically selected for the collection of rainwater. The total area of the prison is 4793.73 m² and in this research only the roof areas of the buildings used to keep inmates in closed and semi-open regimes were used. In total, 3483.53 m² were considered, which guarantees an annual capture of 4314 m³ of water and corresponds to 17% of the water consumed in the prison, providing potential savings of US\$ 5408 per year. After collection, the water was filtered through an activated carbon filter to be applied as reuse water. The results demonstrate significant reductions for all parameters analyzed. In general, the average efficiency was above 70%. The best results were obtained for the removal of suspended solids (94%), dissolved solids (94%), total solids (83) and phosphorus (81%). In addition, removal values for color, chlorides and nitrate were around 70%, verifying that the filtration system with activated carbon is efficient for harvested rainwater.

Keywords: rainwater, contamination, treatment, activated charcoal, prison system

1. Introduction

Water is an essential resource for life on earth. Around 70% of the planet surface is covered by water but only a small portion is considered suitable for human consumption (Suguio, 2008; Alim et al., 2019). Potable water is a finite resource and is becoming increasingly scarce due to factors such as the increase in world population, increasing levels of urbanization, pollution and poor management of water resources. Thus, the trend is that the gap between the consumption needs and the supply of water is increasing, and some studies have indicated that the demand for water will increase by 50% by 2050 (Santos et al., 2020; Wurthmann, 2019; Haque et al., 2016; Gomez et al., 2017; Forrest, 2020). The search for alternatives to collect and reuse water is therefore of utmost importance. A very interesting and promising approach is the collection and efficient use of rainwater, which has been practiced for many years. This is increasingly the object of study for the supply of water in regions lacking centralized water supply systems or to contribute to the reuse and rationing of this resource. The technique consists of collecting rainwater runoff from surfaces such as roofs, through a capture system that, in general, is composed of three main components: capture, storage and treatment (Haque et al., 2016; Stang et al., 2021).

A rainwater collection system can be applied in domestic, commercial and industrial environments. The water from this system can be used for non-potable purposes, such as the irrigation of gardens in domestic or public environments, car washing, use in bathrooms and washing in general. However, to obtain water fit for drinking, appropriate water treatment is required (Alim et al., 2019; Reyneke et al., 2020; Xu et al., 2020).

It is important to emphasize that in times of water scarcity, water management in government agencies is an important factor that can contribute to mitigating adverse effects and reducing the use of potable water. One option in this regard is the collection and reuse of rainwater in schools, public buildings and prisons (Chen et al., 2021; Santos, 2020). The government of Santa Catarina State, Brazil, has been investing in the construction of new prisons, as well as in the renovation and expansion of old units to provide a better quality of life for the inmates. The construction of a prison must follow the Basic Guidelines for Criminal Architecture, prepared by the Ministry of Justice and Public Security (Brasil, 2011). The penitentiary system of Santa Catarina State is renowned in Brazil for the execution of public policies aimed at resocialization through work and educational activity in prisons, with a total of 6310 inmates working and 4503 inmates

studying inside and outside these establishments (Brazil, 2022). Likewise, the legal system must be responsible for mitigating the problems associated with applying the custodial sentence and preparing the inmate for the return to life outside prison, in such a way that it is possible to peacefully coexistence in society (Cruz, 2010). With regard to the supply of water to the inmates of prison units, as described in the publication Basic Guidelines for Penal Architecture, the buildings must be designed, preferably, considering the installations necessary for the storage and distribution of drinking water, as well as the appropriate sanitary conditions, water and sewage pipes, drainage system, reuse of water and use of rainwater (Brazil, 2011).

In Brazil there is no standard that addresses water consumption in prison units and few authors have determined the per capita consumption requirements per inmate. A publication by Sperling (2005) presents a per capita consumption in the prison units of 200 to 500 liters/inmate/day while the technical standard prepared by the Basic Sanitation Company of São Paulo State (SABESP - NTS 181) suggests between 100 to 190 liters/inmate/day (SABESP, 2017).

In the municipality of Tubarão, Santa Catarina, four prison units are installed, and the Male Penitentiary and the semi-open regime unit were selected to carry out this case study. This unit has a capacity of 224 and 277 inmates are currently received, respecting Resolution No. 5, of November 25, 2016, which establishes the maximum capacity in prisons in Brazil, considering overcrowding above 137.5% ideal capacity. The average daily consumption of drinking water in this prison is 314.33 liters/day per inmate, this being distributed among all the activities carried out, such as laundry, kitchen, bathroom, car washing, consumption, washing and visits. The factors that most influence water consumption in a penitentiary are the climatic characteristics of the region, the state of conservation of the hydraulic installations and the daily routine and activities of the inmates (Nembrini, 2005). Some penitentiary units in Brazil have tried to reduce water consumption in their buildings by using more economical and efficient hydraulic products, as well as adopting behaviors aimed at optimizing water use (Mota, 2020).

Thus, a good understanding of water consumption in penitentiary units serves as a basis for the development of strategies aimed at the economic and rational use of this resource, in addition to enabling intervention in cases of resource wastage, and with this approach considerable financial savings can also be achieved (Mota, 2020). In this context, the collection of rainwater in prisons would be a viable alternative to minimize the costs and

consumption of potable water. In addition, rainwater harvesting systems for water supply in homes or public properties are in line with the Sustainable Development Goals (SDGs), which make up the agenda established by the United Nations (UN) to be met by 2030, specifically SDG 6, which deals with water and sanitation and SDG 12, which deals with sustainable consumption and production.

It is important to note that no studies reporting the reuse of rainwater in a prison in Santa Catarina State, Brazil, could be found in the literature. Thus, the objective of this research was to perform a case study to evaluate the possibility for the reuse of rainwater in two units of the prison system in this state. The results will contribute to the development of public policies and could guide prison managers in the construction and adaptation of future facilities.

2. Materials and Methods

Samples of rainwater were obtained from points around the Tubarão prison in Santa Catarina State, southern Brazil. Sample collection was carried out according to official Brazilian methodologies NBR 9897 and NBR 9898 (ABNT, 1987).

2.1 Area of Study: Prison System

The city of Tubarão is located in the south of Santa Catarina State, 144 km from the state capital, Florianópolis. Logistically, the municipality is favored by being crossed by a major federal highway (BR-101) and it also has a rail network and regional airport and is very close to the seaports of Laguna and Imbituba. Currently, Tubarão is home to several industrial plants as well as trading and service companies, being known as a hub in the areas of health and education. The climate in this region is characterized by well-defined seasons, with hot and humid summers and cold winters with strong winds. During the year the temperature generally ranges from 12 °C to 29 °C and is rarely below 8 °C or above 33 °C. In addition, the city of Tubarão has significant rainfall throughout the year and even in the driest months notable rainfall levels are recorded, with an annual average of 1240 mm (Climatempo, 2022).

The rainwater harvesting system used in this case study was sized specifically for the men's penitentiary in the city of Tubarão, which opened in August 2021 and has a capacity of 224. According to the design of this prison, the total roof area of the closed-regime unit is 4793.73 m² and the roof area of the semi-open-regime unit is 650 m², thus totaling 5443.73 m². However, for the calculation of the rainwater catchment area, roof areas of

2833.53 m² for the closed-regime unit and 650 m² for the total area of the semi-open-regime unit were used. These values were based on the architecture of this prison, aiming to facilitate the future implementation of the rainwater harvesting system on site. Although rainwater harvesting considers areas of the roofs of two prisons, closed and semi-open regime, the data referring to the consumption of drinking water only relates to the closed-regime unit. Thus, the calculations of rainwater use are based only on the closed-regime prison.

2.2 Sampling Points and Rainwater Analysis

Three sampling points were strategically selected for the collection of rainwater. The precise locations of sampling points are 28°29'37" S 49°1'9" W, 28°28'00" S 49°00'25" W and 28°28'36" S 49°1'31" W, mapped by GPS, as shown in Figure 1.

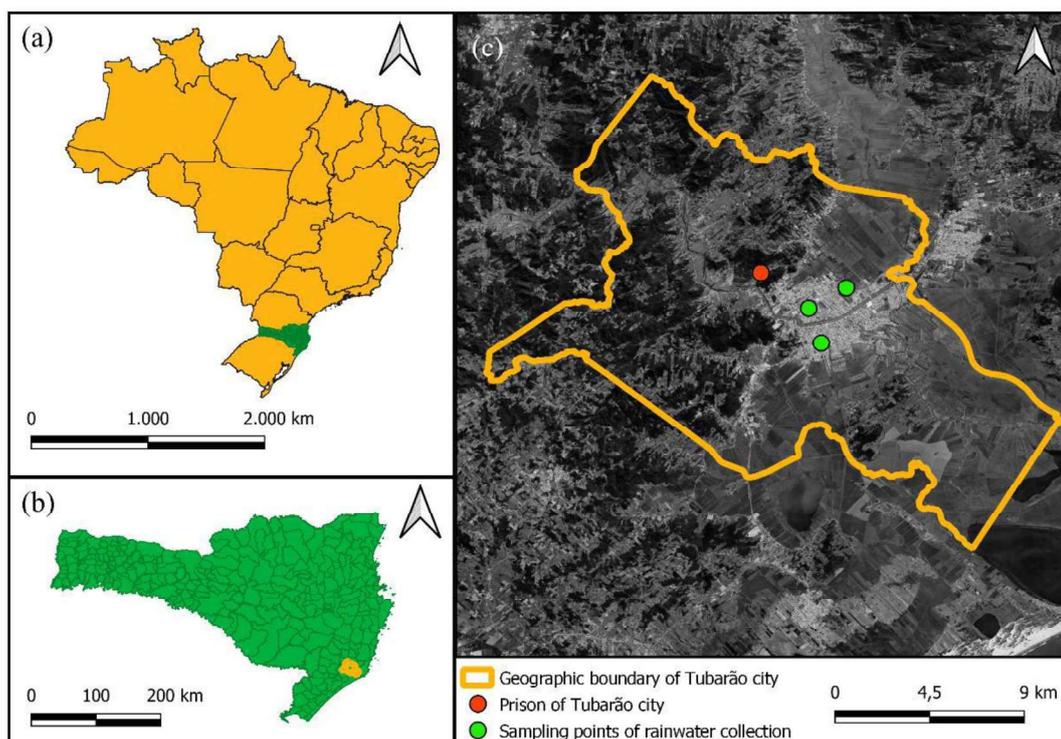


Figure 1. a) Location of Santa Catarina State (green) in Brazil; b) Location of Tubarão (yellow) in Santa Catarina State; and c) Location of the prison and sampling points of rainwater collection in Tubarão

The physicochemical analysis of the rainwater before and after filtration was performed according to the procedures of the Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition, and the specific methods are given in Table 1 (APHA, 2012).

The pH of the samples was measured using a portable HANNA pH meter. All analyses were performed in triplicate and data are expressed as mean values.

2.3 Rainwater Collection

The correct sizing of a rainwater collection system requires data on the pluviometric index of the region and the roof area available for collection. The volume of water that can be collected from a roof is then calculated as the roof area (m²) multiplied by the rainfall index of the region (mm), as represented by equation 1. In addition to this information, the average water consumption and the destination of the water collected as rain are variables that must be considered for the elaboration of the final project. In the present case study, it was not possible to obtain the average consumption of water per person associated with the different uses of water (food, personal hygiene, cleaning the environment, etc.), since the Santa Catarina prison system does not collect data on these variables.

$$V = A \times IP \quad (01)$$

where V is the collected volume of rainwater (m³), A is the roof area (m²) and IP is the rainfall of the region (mm).

2.4 Filtration of Water

An activated carbon filter was used for the removal of the rainwater contaminants. Commercial activated carbon, CARBOTRAT Premium, was obtained from the company Carbonífera Criciúma S.A. According to the manufacturer, activated carbon has a high hydraulic conductivity, good mechanical resistance to abrasion, low solubility in acid and basic media, high particle size uniformity with an effective diameter of 0.85 mm and a uniformity coefficient of 1.5 mm.

The adsorption of pollutants was studied in a batch system through tests using a fixed-bed column. The experiments were carried out in a glass column with an internal diameter of 1.5 cm and height of 20 cm. The flow rate evaluated was 5 mL per min. The carbon bed had a mass of 5 g, which generated a height of approximately 3 cm. The operation proceeded until column saturation was reached. For the disinfection of the water, a dosage of 2.0 mg L⁻¹ of free chlorine was applied to the water from the filtration stage, with a contact time of 10 min.

3. Results and Discussion

In the past 30 years, the rainfall in the municipality of Tubarão has been consistent and relatively high. The wettest season of the year is spring, presenting an average rainfall of 116 mm per month, followed by summer (110 mm), autumn (102 mm) and winter (84 mm), as seen in Table 1.

Table 1. Mean rainfall over the past 30 years in the city of Tubarão, Santa Catarina

Month	Rainfall index
January	125
February	110
March	105
April	95
May	106
June	77
July	88
August	88
September	118
October	118
November	113
December	97

Source: Climatempo.

The consistency of high rainfall in recent years in the municipality of Tubarão shows that the municipality has great potential for the collection and use of rainwater and this could guarantee the supply of water in regions with high levels of poverty or in places where consumption is elevated. Due to the scarcity of water around the world, other cities already use urban rainwater collection as a means of avoiding rationing and a lack of water. An example is the good results obtained in the city of Tucson, Arizona, USA, where activists developed a project to collect and reuse rainwater to establish a more sustainable community and solve environmental problems related to water shortages (Elder, Gerlak, 2019). Another study conducted in Florida shows the feasibility of a residential rainwater harvesting system, deployed to reduce demand and complement existing centralized water supply systems, in a densely populated region of southeast Florida. The results obtained suggest that the expected costs of the water supplied by the decentralized system would be significantly lower than the expected costs of the water supplied by all alternatives of the centralized water supply system (Wurthmann, 2020).

Castonguay et al. (2018) described the development of a model to simulate the adoption of decentralized water solutions and its application and validation in the context of rainwater harvesting in Melbourne. The results provided a valuable insight into the combination of

economic and regulatory instruments needed to influence household behavior and trigger the adoption of decentralized technology, in addition to acting as a guide for the water management process. Although the rainwater collection process is well described in the literature, most research involves specific or residential installations, but the methods and technologies can be applied to any type of building. No studies reporting the application of rainwater collection and reuse in a prison system could be found in the literature.

The Tubarão prison complex has a total roof area of 4793.73 m². However, in the present case study, only the roof areas of the units of the closed (2833.53 m²) and semi-open (650 m²) regime were considered, giving a total area of 3483.53 m² for rainwater collection, as shown in Figure 2.

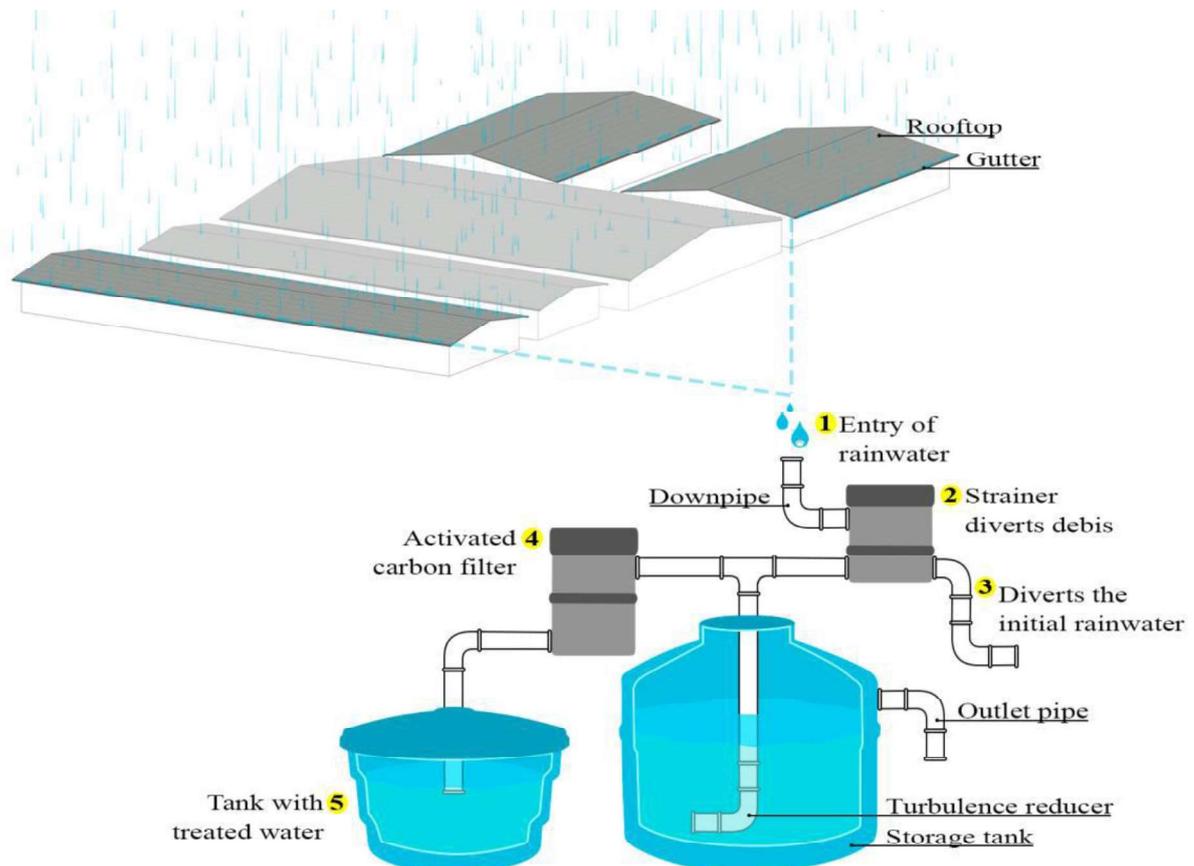


Figure 2. Schematic representation of the roof area and the rainwater collection system used for rainwater collection at the Tubarão prison complex

Based on the rainfall index of the municipality and the roof area available for rainwater collection, the average volume of rainwater that could be collected during the year was calculated, as shown in Table 2.

Table 2. Total volume of rainwater that could be collected in 2021 at the prison units in Tubarão, Santa Catarina

Month	Total collected (m3)
Janeiro	435
Fevereiro	383
Março	365
Abril	330
Mai	369
Junho	268
Julho	306
Agosto	306
Setembro	411
Outubro	411
Novembro	393
Dezembro	337
Total	4314

According to Table 2, the total volume that could be collected during the year 2021 was 4314 m³, and the lowest rainfall levels were observed in the months of June and July, with monthly averages of 268 and 306 m³, respectively. However, the season with highest rainfall is spring (September, October and November, with average monthly volumes to be collected of 411, 411 and 393, respectively). An exception is January, with an average volume to be collected of 435 m³, which is higher than the monthly averages observed for the spring months. The monthly rainfall volumes that could be collected from the roofs and reused in the Tubarão prison units in Santa Catarina State could contribute to minimizing the costs associated with water consumption in the penitentiary. The data available on water consumption in the Tubarão prison, from its opening in August 2021 until the last billed month (March 2022), are presented in Table 3.

The establishment is designed to receive 224 detainees. However, for security reasons, in the first month the prison housed 80 detainees and in the following months it operated at full capacity and was even overcrowded. At this prison, water consumption is relatively high, with a total average consumption for the period considered of 2129 m³ and an average consumption per detainee of 314.33 liters/day, which is approximately 2.16 times greater than the average provided by the Basic Sanitation Company of the State of São Paulo (SABESP-NTS 181), which suggests an average value per detainee of 145 liters/day.

Table 3. Relation between the number of inmates and the volume of water consumed in the prison of Tubarão, Santa Catarina

Month	Consumption (m ³)	Number of inmates	Internal Consumption/day (L)	Rainwater collected (m ³)	% Collected in relation to consumption
ago/21	1187	80	494,58	306	25
set/21	1576	214	245,48	411	26
out/21	1904	256	247,91	411	26
nov/21	2180	260	279,48	393	18
dez/21	2249	269	278,68	337	14
jan/22	2482	265	312,2	435	17
fev/22	2207	277	265,58	383	17
mar/22	3247	277	390,73	365	11
Média	2129	237,25	314,33	380	17

Since its opening (i.e., from 08/2021 to 03/2022) the Tubarão prison has consumed approximately 17,032 m³ of drinking water. The water supply company for the region charges an average of US\$ 1.78 per m³, which indicates that during the eight months of operation the prison unit had a charge of approximately US\$ 30,294 for the service of supplying drinking water. With the installation of a rainwater collection and reuse system, using as a reference the rainfall index in the city of Tubarão, from 08/2021 to 03/2022 it would have been possible to capture approximately 3041 m³, with a monthly average of 380 m³, which corresponds to 17% of the total water consumed in the prison in this period (Table 3). This would mean savings of approximately US\$ 5,408 per year. In addition, it should be noted that the potable water provided by the supply company is used in the prison units for cleaning the cells and other environments, the flushing of toilets and other uses that do not require potable water. Thus, the use of rainwater collected at the prison, in addition to monetary gain, can provide inmates with the most rational use of drinking water available on the planet (Gómez et al., 2017). The monthly rainfall data allow the ideal area required to meet the water needs of the prison system units to be defined. Analysis was carried out on the as-collected rainwater and rainwater treated/filtered with activated carbon and the results are shown in Table 4.

Table 4. Results obtained for the characterization of the as-collected rainwater and rainwater treated/filtered with activated carbon

Parameters	Untreated Rainwater	Rainwater treated by filtration	Removal (%)	Method
Color	16,1 ± 2,8	4,5 ± 1,2	72	SM 2120 C
Turbidity	7,5 ± 1,5	3,0 ± 1,0	60	SM 2130 B
Iron	0,28 ± 0,05	0,10 ± 0,02	64	SM 3111 AB
Sulfate	11,2 ± 2,4	3,8 ± 1,5	66	SM 4500 SO4
Chlorides	18,5 ± 3,5	4,8 ± 1,8	74	SM 4500 Cl-B

Suspended Solids	43 ± 12,6	2,6 ± 0,5	94	SM 2540 D
Total Solids	207 ± 8,5	34,2 ± 6,2	83	SM 2540B
Dissolved solids	164 ± 22,4	9,8 ± 2,6	94	SM 2540 C
Phosphorus	0,26 ± 0,02	0,05 ± 0,01	81	SM 4500-P
Nitrate	11,6 ± 1,4	3,1 ± 1,4	73	EPA 1687

The initial characterization of the rainwater was necessary as some factors can interfere with the treatment process. Studies indicate that environmental factors such as pH, temperature, solid particles, salinity, total nitrogen and organic matter can influence the treatment process (Li et al., 2021). The water was filtered through an activated carbon filter to increase the possibilities for reuse. The results demonstrate significant reductions for all parameters analyzed. In general, the average efficiency was above 70%, and the best results were observed for the removal of suspended solids (94%), dissolved solids (94%), total solids (83) and phosphorus (81%). However, the values for color, chlorides and nitrate were above 70%. These results verify that filtration with activated carbon is efficient for rainwater treatment. Da Costa et al. (2021) obtained similar results in the treatment of rainwater using an acrylic blanket as a filter medium in a company located in the industrial city of Itaboraí, Rio de Janeiro State, Brazil. The water characteristics before and after contact with the roof and after undergoing treatment with the filter medium were monitored. The authors reported lower average removals for color (58.84%) and turbidity (59.55%), however, without the disposal of the initial rainwater collected and with lower installation and operation costs.

Although rainwater harvesting has been extensively studied in recent years, most authors have evaluated the efficiency of harvesting with treatment based on bioretention. Bioretention requires the selection of plants, fillers and structures. The original concept of bioretention areas was based on the comprehensive effects of soil, plants and microorganisms, where the soil and plants are the main factors affecting the efficiency of the treatment achieved (Li et al., 2021). However, the application of membrane filtration technology (Liu et al., 2021) and electrocoagulation coupled to a membrane bioreactor is gaining ground. This technology shows excellent performance in the purification of rainwater based on results for the turbidity (<0.1 NTU), NH₃-N (<0.1 mg L⁻¹), total phosphorus (<0.05 mg L⁻¹), heavy metals (e.g., Cr, Zn and Cu) and organic matter (1.0 ± 0.4 mg L⁻¹), regardless of the water load applied. In addition, electrocoagulation can

effectively coagulate bacteria and facilitate membrane bioreactor bioactivity, as demonstrated in rainwater treatment (Xu et al., 2021).

In guidelines for the direct reuse of rainwater, the United States Environmental Protection Agency (US-EPA, 1993) recommends its application for recreational fields and golf course irrigation, landscape irrigation, fire protection and toilet flushing, among other uses, and these are important components of the reclaimed water portfolio of many urban reuse programs. Also, treated rainwater can be used for some agriculture, environmental and industrial purposes. It is important to highlight that the greatest advantage of the water reuse process is the preservation of drinking water on the planet. By reusing water for different functions, we can preserve natural sources, saving these reserves for the future. In addition, reuse water helps to lower water and electricity bills and reduces the volume of wastewater discharged.

4. Conclusions

After analyzing the results obtained, it can be concluded that with the installation of a rainwater collection and reuse system in the Tubarão prison, using the roof areas of the units of the closed and semi-open regimes (3483.53 m²) and taking as a reference the rainfall in the city of Tubarão, in the period of 08/2021 to 03/2022 it would have been possible to capture approximately 3041 m³ of rainwater, with a monthly average of 380 m³. This corresponds to 17% of the total water consumed in the prison during this period, which could represent savings of approximately US\$ 5,408 per year.

In addition, the results indicate that activated carbon filtration is appropriate for rainwater treatment, with an average efficiency, considering the parameters evaluated, of > 70%. The best results were obtained for the removal of suspended solids (94%), dissolved solids (94%), total solids (83) and phosphorus (81%). In addition, the color, chloride and nitrate values were above 70%. Thus, the rainwater harvested could be considered suitable for reuse for non-potable purposes, after passing through an activated carbon filter and a disinfection process.

Acknowledgments

The authors are very grateful to the Southern University of Santa Catarina (UNISUL) and the Ânima Institute.

References

- ABNT. (1987). NBR 9897: *Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores*. Rio de Janeiro.
- ABNT. (1987). NBR 9898: *Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores*. Rio de Janeiro.
- APHA. (2012). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 22nd ed. Washington.
- Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., & Shirin, S. (2019). Suitability of Roof Harvested Rainwater for Potential Potable Water Production: A Scoping Review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119226. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119226>
- Brasil. Santa Catarina. Secretaria de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa, 2022.
- Brasil. Ministério da Justiça e Segurança Pública - Conselho Nacional de Política Criminal e Penitenciária – CNPCP : Resolução nº 09/2011: Diretrizes básicas para arquitetura prisional./ Revisão técnica (ortográfica e metodológica), 2011.
- Castonguay, A. C., Urich, C., Iftekhar, M. S., & Deletic, A. (2018). Modelling urban water management transitions: A case of rainwater harvesting. *Environmental Modelling & Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.001>
- Chen, W., Gao, W., Jiang, J., Wei, X., & Wang, R. (2021). Feasibility analysis of decentralized hybrid rainwater-graywater systems in a public building in Japan. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102870. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102870>
- Climatempo. Climatologia e histórico de previsão do tempo em Tubarão, BR. Santa Catarina. Available in: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/1445/tubarao-sc>>. Access in May 2022.
- Cruz, M. V. G. da C. (2010). De cadeia a penitenciária: uma análise da política prisional de Minas Gerais. Encontro de Administração Pública e Governança, p. 1-17, Anais, Espírito Santo. ANPAD.
- Da Costa, P. C. L., De Azevedo, A. R. G., Da Silva, F. C., Cecchin, D., & Do Carmo, D. F. (2021). Rainwater treatment using an acrylic blanket as a filtering media. *Journal of Cleaner Production*, 303, 126964. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126964>
- Elder, A. D., & Gerlak, A. K. (2019). Interrogating rainwater harvesting as Do-It-Yourself (DIY) Urbanism. *Geoforum*. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.06.007>
- Forrest, N., Stein, Z., & Wiek, A. (2020). Transferability and scalability of sustainable urban water solutions—A case study from the Colorado River Basin. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104790. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104790>
- Gomez, Y. D., & Teixeira, L. G.. (2017). Residential rainwater harvesting: Effects of incentive policies and water consumption over economic feasibility. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.015>
- Haque, M. M., Rahman, A., & Samali, B. (2016). Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production*, 137, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.038>
- Li, G., Xiong, J., Zhu, J., Liu, Y., & Dzakpasu, M. (2021). Design influence and evaluation model of bioretention in rainwater treatment: A review. *Science of The Total Environment*, 787, 147592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147592>

Liu, X., Ren, Z., Ngo, H. H., He, X., Desmond, P., & Ding, A. (2021). Membrane technology for rainwater treatment and reuse: A mini review. *Water Cycle*, 2, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.08.001>

Mota, S. S., Fava, D. F., & Jesus, J. M. H. (2021). Diagnostic of the water consumption in social Educational and resocialization units and proposal for intervention aiming to sustainability. *Revista DAE*, 69(231), 06-25.

Nembrini, P. G. (2005). International Committee of the Red Cross – ICRC. Water sanitation hygiene and habitat in prisons. Geneva - Switzerland.

Reyneke, B., Waso, M., Khan, S., & Khan, W. (2020). Rainwater treatment technologies: Research needs, recent advances and effective monitoring strategies. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 16, 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.02.010>

SABESP. Norma tecnica SABESP - NTS 181 - Dimensionamento do ramal predial de água, cavalete e hidrômetro – Primeira ligação, São Paulo, 2017.

Santos, C., Imteaz, M. A., Ghisic, E., & Matos, C. (2020). The effect of climate change on domestic Rainwater Harvesting. *Science of The Total Environment*, 729, 138967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138967>

Sperling, M. V. (2005). Introdução à qualidade das águas e tratamento de esgoto. 3rd ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais,. 243p.

Stang, S., Khal, M., Merek, P., Palace, M., Lu, Z., & Mo, W. (2021). Spatially optimized distribution of household rainwater harvesting and greywater recycling systems. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127736. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127736>

Suguio, K. (2008). Mudanças ambientais da terra. Secretaria do Meio Ambiente: Instituto Geológico, São Paulo.

US-EPA: CFR 40 part 503-Standards for the use or disposal of sewage sludge. US-EPA, Washington, DC. 1993.

Wurthmann, K. (2019). Assessing storage requirements, water and energy savings, and costs associated with a residential rainwater harvesting system deployed across two counties in Southeast Florida. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109673>

Xu, J., Du, X., Zhao, W., Wang, Z., Lu, X., Zhu, L., Wang, Z., & Liang, H. (2021). Roofing rainwater cleaner production using pilot-scale electrocoagulation coupled with a gravity-driven membrane bioreactor (EC-GDMBR): Water treatment and energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128055. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128055>

Xu, L., Yang, S., Zhang, Y., Jin, Z., Huang, X., Bei, K., ... & Zheng, X. (2020). A hydroponic green roof system for rainwater collection and greywater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121132>

CONCLUSÃO

O consumo de água dentro de unidades prisionais é um tema pouco difundido na literatura, sendo o levantamento de dados precário e de difícil acesso. Isso dificulta na elaboração de projetos de unidades prisionais mais sustentáveis. Com os dados levantados, observou-se que o consumo em média nas cadeias catarinenses está abaixo da média da literatura analisada. Porém, mesmo com valores em volumes abaixo, os valores em moeda US\$(dólares) gastos em apenas dois anos ultrapassa US\$ 1,8 milhões.

Como alternativa, a captação de água da chuva se mostra uma ferramenta viável para o fornecimento de água da chuva, pois a água passando por um simples tratamento com carvão ativado se torna uma água de excelente qualidade para o uso não nobre nas unidades prisionais catarinense. Já nas unidades que apresentam estações de tratamento de água - ETA's próprias, a água da chuva pode ser encaminhada as respectivas ETA's e receber o devido tratamento para posterior fornecimento aos apenados na forma de água potável.

O uso da modelagem dinâmica para a verificação da viabilidade de implementação de sistemas de captação de água da chuva em estabelecimentos prisionais se mostrou como uma ferramenta prática e de grande valor no auxílio dos gestores públicos para tomada de decisões, podendo auxiliar na elaboração de cronogramas de implantações de sistemas de captação assim como na elaboração planejamento orçamentário para realização das obras necessárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil. Santa Catarina. Secretaria de Estado da Administração Prisional e Socioeducativa, 2023. Acesso em: 20 nov. 2023.

El Tugoz, J., Bertolini, G. R. F., & Brandalise, L. T. (2017). Captação e aproveitamento da água das chuvas: o caminho para uma escola sustentável. *Revista de gestão ambiental e sustentabilidade*, 6(1), 26-39.

ESCAP, U. (2013). *Water security & the global water agenda: A UN-water analytical brief*. United Nations University (UNU).

Goldenfum, J. A. (2006). *Reaproveitamento de águas pluviais*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

Gomes, U. A. F., Domènech, L., Pena, J. L., Heller, L., & Palmier, L. R. (2014). A captação de água de chuva no Brasil: novos aportes a partir de um olhar internacional. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(1), 7-16.

Hadiwibowo, J. C., Halim, S., Yahya, B. N., Agustin, K., & Sahputra, I. H. (2021, April). A policy strategy evaluation for covid-19 pandemic in the city of surabaya using vensim ventana dynamic system simulation. In *2021 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIconCIT)* (pp. 215-221). IEEE.

Ohlund, R. J., Dahdah, B. H., Guillen, G. R., & Childress, A. E. (2024). Augmenting ocean water desalination with potable reuse: Concept feasibility in terms of cost and environmental impacts. *Desalination*, 569, 116941.

Perveen, S. (2023). Drinking water quality monitoring, assessment and management in Pakistan: A review. *Heliyon*.