



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MARIANA PEREIRA RIBEIRO DE QUEIROZ

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA ESCOADA EM TELHADO ECOLÓGICO DE
BAIXO CUSTO COM COBERTURA VEGETAL DE ARANTO (*KALANCHOE
LAETIVIRENS*)**

Caruaru

2023

MARIANA PEREIRA RIBEIRO DE QUEIROZ

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA ESCOADA EM TELHADO ECOLÓGICO DE
BAIXO CUSTO COM COBERTURA VEGETAL DE ARANTO (*KALANCHOE
LAETIVIRENS*)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos

Caruaru

2023

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Queiroz, Mariana Pereira Ribeiro de.

Análise da qualidade da água escoada em telhado ecológico de baixo custo com cobertura vegetal de aranto (*Kalanchoe Laetivirens*) / Mariana Pereira Ribeiro de Queiroz. - Caruaru/PE, 2023.

97f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Orientação: Érika Pinto Marinho.

Coorientação: Sylvana Melo dos Santos.

Inclui referências.

1. Telhados ecológicos; 2. Garrafa PET; 3. Qualidade da água.
I. Marinho, Érika Pinto. II. Santos, Sylvana Melo dos. III.
Título.

UFPE-Biblioteca Central

MARIANA PEREIRA RIBEIRO DE QUEIROZ

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA ESCOADA EM TELHADOS ECOLÓGICOS
DE BAIXO CUSTO COM COBERTURA VEGETAL DE ARANTO (*KALANCHOE
LAETIVIRENS*)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovado em: 30/01/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Bruna Soares Fernandes (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar e me sustentar em todos os momentos. Especialmente por me dar forças para perseverar na direção dos meus sonhos, tendo a certeza de que Ele me guia e me ilumina.

A minha família, especialmente meus pais Raniere Queiroz e Sueli Queiroz, pelo apoio dado nesta caminhada, que sempre me incentivaram a estudar e a batalhar pelos meus objetivos. Ao meu pai destaco a ajuda em contribuir para a construção do telhado ecológico e pelas ideias dadas para a adaptação necessária do sistema do telhado para esta pesquisa, sempre criativo e prestativo, que não mediu esforços para ver o telhado pronto. Além disso, agradeço aos meus pais pelo amor e dedicação ao longo de toda a minha vida, por nunca deixarem me faltar nada.

Ao meu namorado, Renato, pelo amor, companheirismo, compreensão e paciência, essenciais durante este período. Agradeço por sempre entender os momentos de estudo e, além disso, por me incentivar a cada passo dado.

A minha orientadora, professora Dr.^a Érika Marinho, por me acolher durante as disciplinas isoladas que cursei e, mais ainda, durante o mestrado. Agradeço por todos os conhecimentos compartilhados e por me acompanhar no desenvolvimento desta dissertação. Sempre calma e paciente, foi peça fundamental nesta caminhada.

A minha coorientadora, professora Dr.^a Sylvana Santos, por toda experiência compartilhada e ideias dadas para o desenvolvimento desta pesquisa, que sempre foram muito valiosas.

Aos técnicos do Laboratório de Química, Wagner, Amanda, Claudete, Henrique e Agilson, por estarem sempre dispostos a me ajudar, a cuidarem das plantinhas na minha ausência e pelo auxílio no laboratório. Em especial, agradeço a Wagner por acompanhar e auxiliar em boa parte das análises realizadas no laboratório, sempre prestativo.

Aos meus amigos, em especial Juliana, Bárbara, Manu, Kenji, Sidrack, Airton e Anderson, por estarem comigo nos momentos de alegria e de desespero do mestrado, por direta ou indiretamente participarem desta caminhada.

A Ranny, que foi aluna do mestrado e autora do projeto que serviu de base para esta dissertação, por me auxiliar na elaboração do telhado ecológico, tirando todas as minhas dúvidas e me passando os conhecimentos adquiridos por ela. A

Jéssica e Márcia, também orientadas da professora Dr.^a Érika no programa de mestrado, que me incentivaram e foram extremamente solícitas, especialmente na reta final desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAM, da Universidade Federal de Pernambuco do Campus Acadêmico do Agreste – UFPE/CAA, pela oportunidade de realizar o mestrado acadêmico.

Ao secretário do PPGECAM, Marcelo, por todo auxílio e por todas as dúvidas tiradas, relacionados ao programa de mestrado.

A todos os professores da graduação e do programa de pós-graduação, ambos da UFPE/CAA, que sempre foram inspiração para a realização deste mestrado.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste mestrado tão sonhado.

RESUMO

Em 2022, a população mundial atingiu a marca de 8 bilhões de habitantes, acompanhada de um aumento do processo de urbanização e transformação das paisagens naturais. Este marco aumenta a preocupação da disponibilidade e responsabilidade sobre o uso e manejo de recursos naturais. Além das consequências do processo de expansão urbana, existem regiões no mundo que possuem características inerentes à localização geográfica, como as regiões semiáridas, que apresentam distribuição de chuvas irregular, produzindo cenários de escassez de água e eventos de enchentes, ao mesmo tempo. Os telhados ecológicos (com ou sem vegetação) surgem como uma técnica capaz de mitigar alguns impactos negativos gerados pela urbanização e de trazer benefícios no gerenciamento de águas pluviais. Este trabalho tem o objetivo de analisar a qualidade da água escoada de telhado ecológico instalado no município de Caruaru e avaliar a possibilidade de uso da água escoada. Foi utilizado um telhado ecológico de garrafa de politereftalato de etileno (PET), visando o uso de material reutilizável na construção do telhado, cobertura vegetal de Aranto (*Kalanchoe laetivirens*) e substrato de terra tratada, comumente usado em agricultura. O arranjo experimental ficou em ambiente fechado, sem exposição a fatores externos que pudessem alterar os resultados. Os parâmetros de qualidade de água investigados foram: cor, sólidos dissolvidos totais, turbidez, temperatura, condutividade elétrica, pH, amônia, nitrato, nitrito, fósforo, fosfato, dureza total, cálcio, magnésio, alcalinidade total, ferro, cloreto e sulfato. Foram realizadas seis precipitações controladas em laboratório utilizando água destilada. Os valores iniciais da análise da água escoada do telhado para condutividade elétrica, dureza total, cálcio, magnésio, cloretos e sulfatos estavam acima dos estabelecidos pela norma de irrigação, no entanto, apresentaram comportamento de redução de valores ao longo das coletas. O pH também apresentou resultado positivo, tendendo à neutralidade. Ultrapassaram os limites estabelecidos os valores de cor, turbidez, sólidos dissolvidos totais para aproveitamento de água de coberturas para fins não potáveis, e fosfato e amônia para uso na irrigação, sendo necessário realizar tratamento, como filtração, para adequação desses parâmetros e reuso da água escoada.

Palavras-chave: Telhados ecológicos. Garrafa PET. Qualidade da água. Semiárido.

ABSTRACT

In 2022, the world population reached the mark of 8 billion inhabitants, accompanied by an increase in the process of urbanization and transformation of natural landscapes. This framework raises concerns about availability and responsibility for the use and management of natural resources. In addition to the consequences of the urban expansion process, there are regions in the world that have characteristics inherent to their geographic location, such as semiarid regions, which have irregular rainfall distribution, producing scenarios of water shortages and flood events at the same time. Ecological roofs (with or without vegetation) emerge as a technique capable of mitigating some negative impacts generated by urbanization and bringing benefits in the management of rainwater. This work aims to analyze runoff water quality from an ecological roof installed in the municipality of Caruaru and to evaluate the possibility of using the runoff water. An ecological roof made of polyethylene terephthalate (PET) bottle was used, aiming at the use of reusable material in the construction of the roof, aranto plant cover (*Kalanchoe laetivirens*) and treated earth substrate, commonly used in agriculture. The experimental arrangement was in a closed environment, without exposure to external factors that could alter the results. The water quality parameters investigated were: color, total dissolved solids, turbidity, temperature, electrical conductivity, pH, ammonia, nitrate, nitrite, phosphorus, phosphate, total hardness, calcium, magnesium, total alkalinity, iron, chloride and sulfate. Six controlled precipitations were carried out in the laboratory using distilled water. The initial values of electrical conductivity, total hardness, calcium, magnesium, chlorides and sulfates were above those established by the irrigation norm, however, they presented a behavior of reduction of values along the collections. The pH also showed a positive result, tending to neutrality. The values for color, turbidity, total dissolved solids for use of roof water for non-potable purposes, and phosphate and ammonia for use in irrigation, exceeded the established limits, requiring treatment, such as filtration, to adapt these parameters and reuse the runoff water.

Keywords: Ecological roof. PET bottle. Water quality. Semiarid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Sistema de telhado verde com utilização de garrafas PET em telhas de fibrocimento, na Colômbia	37
Figura 2 –	Módulos de telhados verdes com camada de garrafas PET e manta de PEAD, em Santa Maria, Rio Grande do Sul	38
Figura 3 –	Protótipo desenvolvido com paredes de garrafas PET e argamassa e cobertura de materiais reutilizáveis, no México	39
Figura 4 –	Protótipos de telhados vegetativos com camada drenante de garrafas PET (à direita) e de bandejas de PEAD (à esquerda), na Colômbia	39
Figura 5 –	Sistema de telhado verde ecológico desenvolvido com garrafas PET, em Caruaru, Pernambuco	41
Figura 6 –	Módulo de telhado verde desenvolvido com garrafas PET e cobertura vegetal de <i>Kalanchoe blossfeldiana</i> , em Santa Maria, Rio Grande do Sul	41
Figura 7 –	Camada de garrafas PET para a construção de um telhado vegetativo, em Santa Maria, Rio Grande do Sul	42
Figura 8 –	Projeto de jardim de cobertura utilizando vasos plásticos e materiais filtrantes alternativos, na Turquia	43
Figura 9 –	Localização do município de Caruaru, estado de Pernambuco, Brasil	45
Figura 10 –	<i>Kalanchoe laetivirens</i> , conhecida como Aranto, cobertura vegetal definida para o telhado ecológico	48
Figura 11 –	Etapas iniciais da montagem do sistema de telhado vegetativo (a) garrafa PET de 2 L marcada com retângulo (b) largura de 9 cm do retângulo marcado (c) comprimento de 18 cm do retângulo (d) marcação do retângulo sendo cortada com auxílio de estilete (e) garrafa PET de 2L com o recorte retirado	49
Figura 12 –	Disposição das ripas de madeira para a formação da estrutura de apoio do telhado vegetativo	50
Figura 13 –	Conexões e tubos de PVC fixados às garrafas	50

Figura 14 – Garrafas PET unidas entre por cabos de cobre fixados por parafusos às ripas de madeira	51
Figura 15 – Vista superior da estrutura do sistema de telhado vegetativo finalizada– Colocação do substrato nas garrafas PET	51
Figura 16 – Colocação do substrato nas garrafas PET	52
Figura 17 – Telhado ecológico localizado do Laboratório de Química da UFPE/CAA	53
Figura 18 – Plantio da cobertura vegetal de Aranto	53
Figura 19 – Kits da empresa Alfakit para análise dos parâmetros físico-químicos da água escoada do telhado ecológico	56
Figura 20 – Desenvolvimento da vegetação nos dias das coletas (a) coleta 1 (b) coleta 2 (c) coleta 3 (d) coleta 4 (e) coleta 5 (f) coleta 6	59
Figura 21 – Escoamento da água do telhado ecológico durante a coleta 1	61
Figura 22 – Escoamento da água do telhado ecológico durante a coleta 6	61
Figura 23 – Valores obtidos de cor aparente (uC) para cada coleta realizada	61
Figura 24 – Valores obtidos de cor verdadeira (uC) para cada coleta realizada	62
Figura 25 – Valores obtidos de turbidez (NTU) para cada coleta realizada	62
Figura 26 – Valores obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para cada coleta realizada	63
Figura 27 – Valores obtidos de condutividade elétrica (dS/m) para cada coleta realizada	64
Figura 28 – Valores obtidos de pH para cada coleta realizada	65
Figura 29 – Valores obtidos de alcalinidade total (mg/L de CaCO ₃) para cada coleta realizada	66
Figura 30 – Valores obtidos de dureza total (mg/L de CaCO ₃) para cada coleta realizada	67
Figura 31 – Valores obtidos de cálcio (mg/L de CaCO ₃) para cada coleta realizada	67
Figura 32 – Valores obtidos de magnésio (mg/L de CaCO ₃) para cada coleta realizada	68

Figura 33 – Valores obtidos de cloretos (mg/L de Cl-) para cada coleta realizada	68
Figura 34 – Valores obtidos de sulfato (mg/L) para cada coleta realizada	69
Figura 35 – Valores obtidos de ferro (mg/L) para cada coleta realizada	70
Figura 36 – Valores obtidos de amônia (mg/L) para cada coleta realizada	71
Figura 37 – Valores obtidos de nitrito (mg/L) para cada coleta realizada	71
Figura 38 – Valores obtidos de fósforo (mg/L) para cada coleta realizada	73
Figura 39 – Valores obtidos de fosfato (mg/L) para cada coleta realizada	73
Figura 40 – Valores obtidos da temperatura (°C) para cada coleta realizada	74
Figura 41 – Valores obtidos da temperatura (°C) para cada coleta e limite da NBR 13.969	76
Figura 42 – Valores obtidos do pH para cada coleta e limites da NBR 13.969	77
Figura 43 – Valores obtidos da turbidez (NTU) para cada coleta e limite da NBR 13.969	77
Figura 44 – Valores obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para cada coleta e limite da NBR 13.969	78
Figura 45 – Valores obtidos de cor aparente (uC) para cada coleta e limite da NBR 15.527	79
Figura 46 – Valores obtidos de pH para cada coleta e limite da NBR 15.527	79
Figura 47 – Valores obtidos de turbidez (NTU) para cada coleta e limite da NBR 15.527	80
Figura 48 – Valores obtidos de pH para cada coleta e limite para água para irrigação	81
Figura 49 – Valores obtidos de condutividade elétrica (dS/m) para cada coleta e limite para água para irrigação	81
Figura 50 – Valores obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação	82
Figura 51 – Valores obtidos de cloretos (mg/L de Cl-) para cada coleta e limite para água para irrigação	82

Figura 52 – Valores obtidos de cálcio (mg/L de CaCO ₃) para cada coleta e limite para água para irrigação	83
Figura 53 – Valores obtidos de magnésio (mg/L de CaCO ₃) para cada coleta e limite para água para irrigação	83
Figura 54 – Valores obtidos de fosfato (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação	84
Figura 55 – Valores obtidos de sulfato (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação	84
Figura 56 – Valores obtidos de amônia (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos dos benefícios do uso dos telhados ecológicos, entre 2010 e 2020	22
Quadro 2 – Estudos da qualidade da água escoada de telhados vegetativos em vários países, entre 2009 e 2020	31
Quadro 3 – Estudos da qualidade da água escoada de telhados vegetativos no Brasil, entre 2012 e 2019	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores limites dos parâmetros do efluente para lançamento nas galerias de águas pluviais e para reuso por classe	24
Tabela 2 – Valores limites dos parâmetros de qualidade da água da chuva para usos não potáveis	24
Tabela 3 – Valores limites usuais dos parâmetros de qualidade da água para irrigação	24
Tabela 4 – Simulação de custos dos materiais utilizados para a elaboração do telhado ecológico com Aranto, baseado nos valores praticados no comércio varejista local em 2020	54
Tabela 5 – Parâmetros físico-químicos a analisar da água escoada do telhado ecológico	56
Tabela 6 – Resultados obtidos para os parâmetros analisados da água escoada do telhado ecológico de baixo custo com vegetação de Aranto no período de coleta do dia 25/11/2021 ao dia 26/05/2022	60
Tabela 7 – Resultados obtidos das coletas realizadas de 25/11/2021 a 26/05/2022 e limites estabelecidos pelos dispositivos pertinentes	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	TELHADOS VERDES E TELHADOS ECOLÓGICOS	20
2.1.1	Telhados ecológicos vegetativos	20
2.1.1.1	Características dos telhados verdes	21
2.2	BENEFÍCIOS DOS TELHADOS ECOLÓGICOS VEGETATIVOS	22
2.3	NORMAS DE PADRÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA	23
2.4	PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA	25
2.4.1	Cor	25
2.4.2	Sólidos dissolvidos totais	25
2.4.3	Turbidez	25
2.4.4	Condutividade elétrica	26
2.4.5	pH	26
2.4.6	Nitrogênio	26
2.4.7	Fósforo	27
2.4.8	Cálcio, magnésio, sódio, potássio e RAS	27
2.4.9	Cloreto e sulfato	28
2.4.10	Carbonatos e bicarbonatos	29
2.5	QUALIDADE DA ÁGUA ESCOADA DOS TELHADOS ECOLÓGICOS VEGETATIVOS	29
2.6	TELHADOS ECOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO	35
2.7	CHUVAS INTENSAS	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	ÁREA DE ESTUDO	45
3.2	SISTEMA DE TELhado ECOLÓGICO DE BAIXO CUSTO	46
3.2.1	Descrição da estrutura de telhado ecológico existente	46
3.2.2	Composição do telhado ecológico de baixo custo	47

3.2.3	Configuração do telhado ecológico de baixo custo	48
3.2.4	Implantação da cobertura vegetal do telhado ecológico de baixo custo	52
3.3	CUSTO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO TELHADO ECOLÓGICO	53
3.4	DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE SIMULADA DE CHUVA	54
3.5	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	ANÁLISES DA QUALIDADE DA ÁGUA DO TELHADO ECOLÓGICO DE BAIXO CUSTO	58
4.1.1	Cor	58
4.1.2	Turbidez	62
4.1.3	Sólidos dissolvidos totais	63
4.1.4	Condutividade elétrica	64
4.1.5	pH	64
4.1.6	Alcalinidade total	65
4.1.7	Dureza total	66
4.1.8	Cloretos	68
4.1.9	Sulfatos	69
4.1.10	Ferro	69
4.1.11	Nitrogênio	70
4.1.12	Fósforo	72
4.1.13	Temperatura	73
4.2	COMPARAÇÃO DAS ANÁLISES COM NORMAS E DISPOSITIVOS PERTINENTES	74
4.2.1	Comparação com a NBR 13.969/97	76
4.2.2	Comparação com a NBR 15.527/19	78
4.2.3	Comparação com a publicação sobre “Qualidade da água para irrigação” da EMBRAPA	80
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
5.1	CONCLUSÕES	86
5.2	RECOMENDAÇÕES	87
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

Embora a um ritmo mais lento do que em qualquer época desde 1950, a população mundial continua a crescer. Em 2022, a população mundial atingiu a marca de 8 bilhões de habitantes, tem-se uma projeção média do crescimento populacional para cerca de 8,5 bilhões em 2030, 9,7 bilhões em 2050 e 10 bilhões em 2100 (UNITED NATIONS, 2019). Além disso, atualmente, mais da metade da população global está concentrada nas áreas urbanas, 55% em 2018 e com expectativa de crescer para 60% em 2030 (UNITED NATIONS, 2018).

Inevitavelmente, o processo de urbanização traz transformações nas paisagens naturais, como a conversão de terrenos não urbanos em áreas construídas, que afetam significativamente os recursos hídricos (BERNDTSSON, 2010; AHIABLAME, 2012; LI *et al.*, 2018). Um dos efeitos dessas transformações é o aumento das áreas impermeabilizadas, que traz consequências para o ambiente e para a infraestrutura das cidades, tendo em vista que, com isso, a infiltração das águas pluviais diminui e, por conseguinte, o escoamento superficial e o pico de vazão aumentam (BERNDTSSON, 2010; ROWE, 2011; HASHEMI *et al.*, 2015; TALEBI *et al.*, 2019). Ocorre também a diminuição das áreas verdes que, por seu turno, acarreta na redução da evapotranspiração e da capacidade de resfriamento dos ambientes, aumentando o efeito de ilhas de calor. Esses impactos levam à necessidade de um planejamento mais inteligente do crescimento urbano, a exemplo da melhor correlação entre os recursos hídricos e o uso e ocupação do solo, como proposto pela Lei Federal N° 9.433/97 (BRASIL, 1997) que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil.

Além das consequências resultantes do processo de expansão urbana, existem regiões no mundo que possuem características decorrentes da sua localização geográfica, onde os componentes hidrológicos são distribuídos de forma desuniforme. Dentre essas localidades se destacam as regiões semiáridas, onde a distribuição de chuvas é irregular, produzindo cenários de escassez de água e eventos de enchentes, ao mesmo tempo (GHEYI *et al.*, 2012; BEECHAM; RAZZAGHMANESH, 2015). Por consequência, essas regiões, como o nordeste do

Brasil, necessitam de boas estratégias no gerenciamento dos recursos hídricos (SANTOS *et al.*, 2011).

Uma das soluções para os problemas causados pela urbanização é a adoção de novos procedimentos de baixo impacto no gerenciamento das águas pluviais, tais como pavimentos permeáveis, sistemas de biorretenção e telhados ecológicos (AHIABLAME, 2012). Estes surgem como uma técnica capaz de mitigar alguns dos impactos negativos gerados pela urbanização, trazendo benefícios no gerenciamento de águas pluviais, melhoria da qualidade do ar urbano, redução do efeito de ilhas de calor, entre outros (BERNDTSSON *et al.*, 2009; CASTLETON *et al.*, 2010; VIJAYARAGHAVAN; RAJA, 2014; CARPENTER *et al.*, 2016; SHAFIQUE *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2019; GONG *et al.*, 2020; NARANJO, *et al.*, 2020).

De acordo com Chen *et al.* (2019), a aplicação dos telhados ecológicos é cada vez mais comum nos países desenvolvidos, como Alemanha, Reino Unido, França, Canadá, Estados Unidos, Singapura e Japão. No Brasil, alguns municípios instituíram benefícios fiscais com o intuito de incentivar a implantação de construções sustentáveis, como a redução do Imposto Predial e Territorial Urbano – IPTU. Dentre os municípios estão: Curitiba – PR com a Lei N° 9.806/2000 (CURITIBA, 2000), Vila Velha – ES com a Lei N° 4.864/2009 (VILA VELHA, 2009), Araraquara – SP com a Lei N°. 889/2018 (ARARAQUARA, 2018) e Guarulhos – SP com a Lei N° 6.793/2010 (GUARULHOS, 2010). Já a cidade de Recife, no estado de Pernambuco, publicou a Lei N° 18.112/2015, que dispõe sobre a melhoria ambiental das edificações, e, ao contrário das leis já citadas, não concede benefício fiscal, mas obriga a instalação de telhado verde, construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo de escoamento das águas pluviais, de acordo com as características das novas edificações que serão construídas (RECIFE, 2015). Em Caruaru, também no estado de Pernambuco, foi instituído o Programa IPTU Verde por meio da Lei Complementar N° 62/2018, que propõe a adoção de medidas que protejam o meio ambiente e estimulem o desenvolvimento sustentável através da redução do tributo, sendo incluída nessas medidas a utilização de telhado verde com espécies nativas da região (CARUARU, 2018).

A instalação de telhados vegetativos é amplamente discutida na literatura. Beecham e Razzaghmanesh (2015) conduziram um estudo sobre a quantidade de água escoada de telhados vegetativos em Adelaide, no sul da Austrália, onde o clima é classificado como mediterrâneo quente. Comparando telhados com e sem

vegetação, os autores observaram que os telhados com vegetação apresentaram maior capacidade de retenção de água da chuva, e o telhado vegetativo do tipo intensivo obteve o melhor resultado médio (89%). Acerca do desempenho térmico, Jiang e Tang (2017) realizaram uma análise da influência de telhados vegetativos extensos instalados em Chongqing, sudoeste da China, e observaram que foi possível reduzir em 2,4 °C a temperatura interna do ambiente ao combinar com ventilação natural com aberturas em relação à combinação com telhados sem vegetação.

No Brasil, mesmo com as características inerentes ao clima, Santos *et al.* (2019) verificaram que a implantação de telhados verdes em parte do telhado de residências de Caruaru, município localizado na região semiárida do estado de Pernambuco, possibilitou um ganho de conforto térmico em relação aos telhados de referência. Já Silva *et al.* (2015), também em Caruaru, analisaram a capacidade de retenção de água pluvial em telhados verdes com vegetação típica da região, a Coroa-de-Frade (*Melocatus Zenterii*), e indicaram o uso dos telhados ecológicos como alternativa para minimizar problemas decorrentes de enchentes na região, visto que foi possível a retenção de água pluvial e atraso no escoamento dessas águas, comparando-se ao telhado com telhas cerâmicas.

Além do cenário de enchentes, a região semiárida também apresenta cenários de escassez de água, como mencionado anteriormente. Por isso, é fundamental o estudo de possibilidades da utilização da água escoada dos telhados ecológicos para auxiliar na otimização dos recursos hídricos. No entanto, a qualidade das águas pluviais escoadas dos telhados vegetativos é uma problemática que necessita ser discutida com maior intensidade, uma vez que a passagem da água pelo telhado permite a solubilização/arraste de nutrientes liberados pelas plantas, de partículas do substrato, matéria orgânica e outros componentes que constituem a estrutura. Este processo pode comprometer a qualidade da água e restringir seu aproveitamento. Neste sentido, e com a preocupação de planejadores e gestores urbanos em relação ao reuso de água, o Grupo de Pesquisa de Tecnologias para o Semiárido, da Universidade Federal de Pernambuco tem desenvolvido vários projetos (FARIAS, 2012; LIMA, 2013; SILVA, 2017; SANTOS *et al.*, 2022). Diante do exposto, o estudo da investigação da qualidade da água de telhados ecológicos em clima semiárido busca contribuir para o aperfeiçoamento e adequabilidade da tecnologia na área de estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade da água escoada de telhado ecológico de baixo custo visando à proposição de reuso.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar os resultados da qualidade da água do telhado ecológico com resultados obtidos de outras pesquisas;
- Avaliar a influência do arranjo sobre a qualidade da água do telhado ecológico;
- Discutir os valores dos parâmetros de qualidade da água escoada do telhado ecológico à luz das normas pertinentes;
- Propor usos da água escoada do telhado ecológico, com base nos resultados dos parâmetros investigados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TELHADOS VERDES E TELHADOS ECOLÓGICOS

Os telhados verdes e telhados ecológicos estão inseridos no grupo de novos procedimentos de baixo impacto para o gerenciamento das águas pluviais, sendo uma técnica utilizada em todo o mundo (BERDNSTSSON, 2010; AHIABLAME, 2012). O interesse global por esses telhados possui como razão a possibilidade do desenvolvimento de uma técnica que ao mesmo tempo em que mitigue problemas relacionados ao clima e à urbanização, não seja uma nova fonte de poluição para o ambiente durante a sua construção ou implantação (KOTZE *et al.*, 2020). Desse modo, é necessário buscar materiais que causem baixo impacto ao ambiente, como materiais reutilizáveis disponíveis na região.

Os telhados verdes correspondem a um sistema construtivo que possui basicamente cobertura vegetal e substrato. Com a incorporação de novos benefícios ambientais a esses telhados, como o uso de material com grande volume de descarte na natureza, a exemplo das garrafas plásticas, encontram-se os chamados telhados ecológicos, podendo conter vegetação ou não na sua estrutura.

2.1.1 Telhados ecológicos vegetativos

Os telhados ecológicos vegetativos são baseados nos telhados verdes, estes que foram criados inicialmente para fins estéticos, como jardins em coberturas para aumentar as áreas de vegetações e funcionar como isolamento (SHAQUIFE *et al.*, 2018). A construção dos telhados verdes é considerada uma técnica antiga, os Jardins Suspensos da Babilônia são considerados os mais famosos da antiguidade, tendo a construção datada por volta de 500 a.C.. Esses jardins possuíam plantas exóticas, animais e um sistema de irrigação que captava água do rio Eufrates. Já na Escandinávia, os telhados eram cobertos com uma mistura de terra e grama, propiciando conforto térmico, ajudando a reter calor no interior das edificações em climas frios e impedindo a sua penetração em climas quentes (WILLES, 2014).

De acordo com Shaquife *et al.* (2018), as primeiras pesquisas sobre telhados verdes foram iniciadas nos anos 60, na Alemanha, devido à crise energética, o objetivo dos telhados era reduzir o consumo de energia nos edifícios. Em 1962, a

primeira publicação foi feita pelo pesquisador alemão Reinhard Bornkamm, a partir de então os estudos foram sendo consolidados e no início dos anos 80 o mercado de construção de telhados verdes expandiu rapidamente na Alemanha. Atualmente, países como EUA, Canadá, Cingapura, Austrália, Hong Kong e Coréia do Sul estão apresentando iniciativas para a aplicação dos chamados telhados ecológicos vegetativos nos edifícios e residências para alcançar os diversos benefícios que essa técnica é capaz de apresentar (SHAQUIFE *et al.*, 2018).

2.1.1.1 Características dos telhados verdes

Os telhados verdes são compostos basicamente por quatro camadas principais: camada de drenagem, camada filtrante, camada de substrato de solo e camada de vegetação (BERNDTSSON, 2010). De acordo com o tipo de vegetação, profundidade da camada de substrato e manutenção, os telhados podem ser divididos em três categorias: intensiva, semi-intensiva e extensiva (HASHEMI *et al.*, 2015).

Os telhados intensivos são formados por camada de substrato profunda responsável pela sustentação dos tipos de plantas típicos dessa categoria, que são árvores e arbustos de maior porte (ROWE, 2011; HASHEMI *et al.*, 2015). Possuem também como característica a demanda por manutenção periódica, envolvendo capinação, fertilização e irrigação (BERNDTSSON, 2010). Os telhados intensivos podem conter uma grande diversidade de vida vegetal, mas eles exigem esforço estrutural adicional, por isso, são mais utilizados em locais públicos e em edifícios com grande capacidade estrutural para suportar o seu peso (ROWE, 2011; HASHEMI *et al.*, 2015; SHAFIQUE *et al.*, 2018).

Já os telhados semi-intensivos possuem profundidade do substrato representando um tipo intermediário entre a categoria intensiva e extensiva. A vegetação típica dos telhados semi-intensivos é de plantas de pequeno porte, pequenos arbustos e gramados, necessitando de manutenção típica de jardins e irrigação regulares (SHAFIQUE *et al.*, 2018).

Os telhados extensivos, por sua vez, são formados por camadas finas de substrato (BERNDTSSON, 2010; ROWE, 2011). As plantas características dos telhados extensivos são de pequeno porte, como as gramíneas e as suculentas, e de baixo peso. Além disso, os telhados extensivos necessitam de pouca ou

nenhuma manutenção e não precisam de irrigações regulares (SHAFIQUE *et al.*, 2018). É o tipo de telhado com vegetação mais comum pela praticidade de implantação e menor custo em comparação aos demais.

2.2 BENEFÍCIOS DOS TELHADOS ECOLÓGICOS VEGETATIVOS

Os telhados ecológicos vegetativos possuem diversos benefícios relacionados à sua utilização como a redução da água de escoamento, diminuição do efeito de ilhas de calor, redução da poluição sonora, aumento da biodiversidade local, estética, lazer e recreação, conforme disposto no Quadro 1.

Quadro 1 – Estudos dos benefícios do uso dos telhados ecológicos, entre 2010 e 2020

Benefícios analisados	Principais observações	Fonte
Retenção hídrica	A composição e espessura do solo, juntamente com o tipo de vegetação são os principais fatores que influenciam a retenção da água.	Berndtsson (2010)
Retenção hídrica	A maior retenção de água nos telhados foi observada durante o período de intensidade de chuva menor.	Santos <i>et al.</i> (2011)
Retenção hídrica	A retenção dos telhados ecológicos vegetativos estava entre 52% e 95%, enquanto o intervalo dos não vegetativos estava entre 31% e 65%.	Beecham e Razzaghmanesh (2015)
Retenção hídrica	Longo período sem chuva tem maior potencial para reter eventos de precipitação.	Carpenter <i>et al.</i> (2016)
Retenção hídrica	Telhados com a utilização de camada adsorvente composta de estrutura porosa no substrato apresentaram melhores desempenhos na retenção hídrica.	Wang <i>et al.</i> (2017)
Desempenho térmico	O telhado ecológico vegetativo proporcionou diminuição de 2,4°C da temperatura interna do ambiente em comparação ao telhado convencional.	Jiang e Tang (2017)
Desempenho térmico	Ao comparar duas vegetações na composição de um telhado (Babosa - <i>Aloe vera</i> e Coroa-de-Frade - <i>Melocactus zehntneri</i>) foi verificado o melhor desempenho térmico no telhado com Babosa.	Santos (2016)
Desempenho térmico	A vegetação do telhado reduziu o efeito de ilha de calor no edifício que estava localizado através do sombreamento das plantas e pela evapotranspiração.	Tan <i>et al.</i> (2017)
Poluição sonora	O telhado ecológico vegetativo foi capaz de atenuar o nível de pressão sonora em mais de 20 dB em alta frequência para som difratado.	Yang <i>et al.</i> (2012)
Poluição sonora	A perda de transmissão sonora aumentou com o aumento da profundidade do substrato.	Connelly e Hodgson (2013)
Biodiversidade	Os telhados ecológicos vegetativos fornecem habitat alternativo, oferecem refúgio e enriquecem a biodiversidade local.	Jim (2017)
Lazer	Jardins em coberturas de grandes edifícios promovem o relaxamento e alívio do estresse dos centros urbanos, proporcionando melhora na saúde física e mental das pessoas.	Manso <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autora

2.3 NORMAS DE PADRÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA

O uso dos telhados ecológicos vegetativos tem sido uma prática amplamente utilizada devido aos vários benefícios que podem ser alcançados com o seu emprego. Criar a possibilidade do reuso da água escoada desses telhados é mais um fator que beneficia ainda mais a técnica. Nesse aspecto, um fator determinante para a qualidade da água escoada é a qualidade da sua fonte e dos poluentes que esta fonte está exposta (BERNDTSSON, 2010; HASHEMI *et al.*, 2015).

A água da chuva é considerada como não poluída, no entanto, pode apresentar contaminantes relacionados às fontes locais e aos ventos, sendo mais comuns os metais pesados, pesticidas, sólidos em suspensão e micro-organismos patogênicos (BERNDTSSON, 2010). A qualidade do efluente escoado dos telhados verdes também é dependente de fatores como a composição e profundidade do substrato, tipo de planta, idade do telhado, fertilizantes e práticas de manutenção (ROWE, 2011; CHEN *et al.*, 2018). Além disso, a época do ano e a intensidade dos eventos chuvosos estão intimamente relacionadas com a qualidade da água.

Para a caracterização das impurezas que podem estar contidas na água, são estabelecidos parâmetros físicos, químicos e biológicos que indicam a sua qualidade, os chamados parâmetros de qualidade da água. Para a análise desses parâmetros são levados em consideração os seguintes dispositivos:

- NBR 13.969 (ABNT, 1997), que dispõe sobre procedimentos técnicos para o projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementar e parâmetros para a disposição final dos efluentes líquidos de tanque séptico, como exibido na Tabela 1;
- NBR 15.527 (ABNT, 2019), que trata do aproveitamento da água da chuva em coberturas de áreas urbanas para fins não potáveis, apresentando conceitos e os parâmetros de qualidade da água da chuva que devem ser analisados no mínimo semestralmente, conforme mostrado na Tabela 2;
- Publicação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMPRAPA (ALMEIDA, 2010), que fornece conceitos básicos e práticos dos parâmetros de qualidade da água para irrigação, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 1 – Valores limites dos parâmetros do efluente para lançamento nas galerias de águas pluviais e para reuso por classe

Parâmetros	Valor classe 1	Valor classe 2	Valor classe 3	Valor classe 4	Valor para lançamento nas galerias de águas pluviais
Turbidez (uT)	< 5	< 5	< 10	-	-
Coliforme fecal (NMP/mL)	< 200/100	< 500/100	< 500/100	< 5000/100	< 1000/100
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	< 200	< 200	-	-	-
Sólidos não filtráveis totais (mg/L)	-	-	-	-	< 50
Sólidos sedimentáveis (mg/L)	-	-	-	-	< 0,5
Oxigênio dissolvido (mg/L)	-	-	-	> 2,0	> 1,0
DBO _{5,20} (mg/L)	-	-	-	-	< 60
DQO (mg/L)	-	-	-	-	< 150
Temperatura (°C)	-	-	-	-	< 40
Óleos e graxas (mg/L)	-	-	-	-	< 50
Cloro residual (mg/L)	0,5 - 1,5	> 0,5	-	-	> 0,5
Acidez e Alcalinidade	6,0 - 8,0	-	-	-	6,0 - 9,0

Legenda: classe 1 - lavagem de carro e reuso com contato direto do usuário com a água; classe 2 - lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins; classe 3 - reuso nas descargas dos vasos sanitários; classe 4 - reuso nos pomares, pastagens, cultivos através de escoamento superficial.

Fonte: Adaptado de ABNT (1997).

Tabela 2 – Valores limites dos parâmetros de qualidade da água da chuva para usos não potáveis

Parâmetros	Valores
<i>Escherichia coli</i>	< 200 NMP / 100 mL
Cor aparente	< 15 uC
Turbidez	< 5,0 uT
Acidez ou Alcalinidade	6,0 - 9,0

Fonte: Adaptado de ABNT (2019).

Tabela 3 – Valores limites usuais dos parâmetros de qualidade da água para irrigação

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Intervalo usual na água de irrigação
Condutividade Elétrica	CE	dS/m	0 - 3
Total de Sais Dissolvidos	TSD	mg/L	0 - 2000
Cálcio	Ca ²⁺	meq/L	0 - 20
Magnésio	Mg ²⁺	meq/L	0 - 5
Sódio	Na ²⁺	meq/L	0 - 40
Carbonatos	CO ₃ ²⁺	meq/L	0 - 0.1
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	meq/L	0 - 10
Cloretos	Cl ⁻	meq/L	0 - 30
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	meq/L	0 - 20
Nitrogênio-Nitrato	N-NO ₃ ⁻	mg/L	0 - 10
Nitrogênio-Amoniacal	N-NH ₄ ⁺	mg/L	0 - 5
Fósforo-Fosfato	P-PO ₄ ³⁻	mg/L	0 - 2
Acidez ou Alcalinidade	pH	-	6 - 8,5
Razão de Adsorção de Sódio	RAS	(mmol/L) ^{1/2}	0 - 15

Fonte: Adaptado de Almeida (2010).

2.4 PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA

2.4.1 Cor

A coloração de uma água está relacionada aos sólidos dissolvidos e pode ser dividida em cor verdadeira e cor aparente. Para a diferenciação entre a cor verdadeira e a aparente, é necessária remoção por centrifugação da parcela relacionada às partículas suspensas (VON SPERLING, 2005). A determinação da intensidade da coloração da água é feita por comparação a uma amostra padrão de cobalto-platina, medida em unidade de cor (uC) ou unidade Hazen (uH) (BRASIL, 2006).

2.4.2 Sólidos dissolvidos totais

Os sólidos totais presentes na água são formados por todos os contaminantes desta, exceto os gases, sendo separados em sólidos dissolvidos e sólidos em suspensão. Os sólidos em suspensão são aqueles que ao passarem por um filtro ficam retidos, devido ao maior tamanho de suas partículas. Já os dissolvidos, são aqueles sólidos que permanecem em solução após a filtração (VON SPERLING, 2005; BRASIL, 2006). Para o padrão de potabilidade da água é considerada a parcela referente aos sólidos dissolvidos totais, sendo a unidade de medida é o miligrama por litro (mg/L) (BRASIL, 2017).

2.4.3 Turbidez

Como mencionado, os sólidos suspensos são aqueles que ao serem filtrados ficam retidos pelo filtro por apresentarem partículas de maiores dimensões (VON SPERLING, 2005). Diretamente relacionado a esses sólidos está a turbidez, parâmetro que avalia o grau de interferência da passagem da luz na água. São os sólidos suspensos os principais componentes que tornam a água turva, sendo expressa a quantidade em unidades de turbidez (uT).

2.4.4 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica da água é a capacidade desta conduzir corrente elétrica e está relacionada com a concentração de sais na água, destacando-se os íons de sódio, potássio, sulfato e cloreto. É considerado um parâmetro importante de qualidade da água utilizada para a irrigação, pois avalia a capacidade da água salinizar o solo (ALMEIDA, 2010). É expressa por unidade de resistência Siemens (S) por unidade de comprimento (cm ou m) e quanto maior a quantidade de íons dissolvidos, maior a condutividade (BRASIL, 2006). A condutividade elétrica da água escoada dos telhados vegetativos pode ser afetada principalmente pela intensidade das chuvas, que se for intensa pode lavar com mais facilidade os sais presentes no solo.

2.4.5 pH

Potencial hidrogeniônico (pH) é um importante parâmetro para a análise da qualidade da água, visto que indica a condição ácida ou básica da água através da concentração de íons H^+ . Este parâmetro é representado em escala antilogarítmica ($pH = -\log[H^+]$), podendo variar de 0 a 14, tendo o valor igual a 7 como condição de pH neutro, valor menor que 7 é considerado pH ácido e maior que 7 é considerado pH básico (VON SPERLING, 2005). A água da chuva possui geralmente valor de pH entre 5 e 6, podendo ser menor nas áreas urbanas devido à poluição atmosférica (HASHEMI *et al.*, 2015).

2.4.6 Nitrogênio

O nitrogênio é encontrado na natureza em diversas formas, como o nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrato, nitrito e molecular. No ciclo do nitrogênio, durante os processos bioquímicos de transformação das formas de nitrogênio, ocorre a participação intensa de bactérias (BRASIL, 2006). Na nitrificação ocorre a oxidação bacteriana do íon amônio a nitrito e de nitrito a nitrato, enquanto que na desnitrificação ocorre a redução bacteriana do nitrato ao gás nitrogênio.

O nitrogênio pode ter diversas origens, como nas proteínas e compostos biológicos, escapando da atmosfera e também origem em fertilizantes (VON

SPERLING, 2005). Os compostos de nitrogênio são macronutrientes nos processos biológicos e exigidos em maior quantidade pelas células vivas, depois do carbono. O nitrogênio-amoniaco superior a 1 mg/L pode ser um indicativo de lixiviação de solos que foram fertilizados com esse elemento (ALMEIDA, 2010).

2.4.7 Fósforo

No geral, o fósforo está presente na água da chuva em pequenas concentrações, apresentando-se mais comumente na forma de ortofosfatos, polifosfatos e fósforos orgânicos (VON SPERLING, 2005; HASHEMI *et al.*, 2015). Assim como o nitrogênio, o fósforo é um dos principais macronutrientes nos processos biológicos. A concentração de fósforo na água é mensurada através da unidade miligrama por litro. A sua presença na água pode ter origem na decomposição de matéria orgânica, compostos do solo, detergentes, fertilizantes e pesticidas (BRASIL, 2006).

2.4.8 Cálcio, magnésio, sódio, potássio e RAS

O cálcio e o magnésio são os principais cátions associados à dureza na água, que é expressa em miligrama por litro de equivalente em carbonato de cálcio (CaCO_3). A origem natural desses cátions na água é geralmente através da dissolução de rochas calcárias, ricas em magnésio e em cálcio. A elevação da dureza, que corresponde à maior concentração desses cátions na água, é responsável pela redução de formação de espuma, aumentando o consumo de sabões, além de provocar incrustações nas tubulações de abastecimento de água (BRASIL, 2006).

O sódio é um elemento essencial para os organismos vivos e está presente na natureza na matéria das plantas e dos animais. A concentração de sódio na água é expressa em miligrama por litro e geralmente medida nas águas utilizadas no consumo humano e na irrigação. Esse parâmetro é importante para a qualidade da água devido ao efeito sobre a permeabilidade do solo, sobre a nutrição e sobre a toxicidade das plantas (ALMEIDA, 2010). Além disso, o sódio juntamente com o cálcio são os principais sais alcalinos relacionados à alcalinidade da água.

O parâmetro que relaciona os três íons mencionados anteriormente (sódio, cálcio e magnésio) é a relação de adsorção de sódio (RAS). A RAS considera a proporção relativa entre a concentração de sódio e as concentrações de cálcio e magnésio, sendo proposto como um indicador de aumento nos teores de sódio na solução do solo. De acordo com Almeida (2010), essa relação é expressa em raiz quadrada do milimol carga por litro (mmol_c/L)^{1/2} e definida pela Equação 1:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2}+Mg^{+2}}{2}}} \quad (1)$$

Em que Na⁺ corresponde à concentração de sódio, Ca⁺² à concentração de cálcio e Mg⁺² à de magnésio.

O íon potássio é um elemento encontrado em pequenas concentrações nas águas naturais, tendo como origem natural principal a lixiviação de rochas sedimentares, que possuem abundância desse elemento (KRESIC, 2006). O potássio contribui ligeiramente para a salinidade dos solos.

2.4.9 Cloreto e sulfato

O ânion cloreto tem sua origem natural na dissolução de sais, como a dissolução de solos e rochas. O cloreto pode causar sabor “salgado” às águas, afetando a qualidade organoléptica da água, e pode provocar corrosão nas estruturas do sistema de abastecimento de água. Além disso, o cloreto pode ser associado a alterações na pressão osmótica de células de micro-organismos aquáticos, interferindo no ecossistema natural (VON SPERLING, 2005; BRASIL, 2006).

O íon sulfato é uma forma derivada da oxidação do enxofre, sendo encontrado em toda precipitação atmosférica, já que é um dos principais constituintes dissolvidos da chuva (KRESIC, 2006). Assim como o cloreto, os ânions sulfatos são capazes de alterar a qualidade organoléptica da água e de provocar corrosão em estruturas hidráulicas. Sulfatos são importantes para os organismos anaeróbios presentes no meio aquático, que utilizam para a respiração o oxigênio contido em seus compostos (BRASIL, 2006). Os cloretos e sulfatos são expressos por miligrama por litro (VON SPERLING, 2005).

2.4.10 Carbonatos e bicarbonatos

Os carbonatos e bicarbonatos são derivados principalmente do gás carbônico da atmosfera, da dissolução de rochas e do solo, e são os principais ânions constituintes da alcalinidade, juntamente com hidróxidos. Os carbonatos são indesejáveis para as águas destinadas à irrigação, pois sua presença na forma de carbonato de cálcio é tóxica para os vegetais (KRESIC, 2006).

De acordo com Von Sperling (2005), na determinação da alcalinidade da água, quando o pH apresenta valor entre 4,4 e 8,3 indica a presença de bicarbonatos, já o pH entre 8,3 e 9,4 corresponde à presença de carbonatos e bicarbonatos, e para o pH maior que 9,4 indica que os principais constituintes são hidróxidos e carbonatos.

2.5 QUALIDADE DA ÁGUA ESCOADA DOS TELHADOS ECOLÓGICOS VEGETATIVOS

Estudos referentes à qualidade da água escoada dos telhados ecológicos vegetativos vêm sendo produzidos (ROWE, 2011; VIJAYARAGHAVAN; RAJA, 2014; BEECHAM; RAZZAGHMANESH, 2015; GONG *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2019). Em relação à qualidade da água escoada dos telhados vegetativos, estes podem contribuir para a redução da poluição como meio adsorvente e filtrante, mas também pode ser fonte de poluentes para a água escoada. Segundo Rowe (2011), fatores como a composição e profundidade do substrato, tipo de planta, idade do telhado, fertilizantes e práticas de manutenção possuem influência.

Dentre os parâmetros analisados nos estudos mundiais acerca da qualidade da água de telhados vegetativos, destacam-se pH, nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos totais, turbidez, metais, matéria orgânica, condutividade elétrica, cloretos e sulfatos. A neutralização do pH é uma importante função do telhado vegetativo, como observado por Vijayaraghavan *et al.* (2012), que, no seu estudo, a água de saída dos telhados apresentou o pH na faixa de 7 a 8. Resultado semelhante ao de Chen *et al.* (2018), que obteve pH igual a 8 do lixiviado do telhado verde estudado e observou que com o passar do tempo esse valor foi atingindo a neutralidade.

Wang *et al.* (2017) descreveram os telhados verdes como sumidouro para a maioria dos metais analisados, ficando de fora o cobre que poderia ter origem na

adição de fertilizantes. Do mesmo modo, Gregoire e Clausen (2011) observaram que o telhado vegetativo foi considerado fonte de cobre na água escoada e sumidouro para o chumbo e zinco. Total de sólidos suspensos, turbidez, condutividade elétrica, cloreto e sulfato são parâmetros que sofrem influência do substrato dos telhados, seja pela presença de partículas finas do solo que acabam lixiviando ou pelo aumento da quantidade de sais da água ao passar pela camada (CHEN *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019). Também relacionado ao substrato e com influência da composição vegetal, estão os parâmetros de matéria orgânica (DBO, DQO e COD), que foram alterados ao passar pelo telhado e apresentaram-se em concentrações maiores. De acordo com Gong *et al.* (2019), ao passar por um telhado com vegetação a DQO da água é maior que em relação a um telhado sem vegetação.

O nitrogênio e o fósforo são nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. No entanto, não existe ainda resultado consistente a respeito do comportamento dos telhados com vegetação em relação ao nitrogênio, seja como fonte, conforme verificado por Liu *et al.* (2019) e por Gong *et al.* (2020), ou como sumidouro, como Berndtsson *et al.* (2009) e Chen *et al.* (2018). Já o fósforo, que aparece principalmente como fosfato, no geral aumenta em relação à água da precipitação, mas não são aumentos significativos (CARPENTER *et al.*, 2016; GONG *et al.*, 2018).

O Quadro 2 apresenta alguns desses estudos relacionados à qualidade da água escoada de telhados vegetativos em cidades nos países Estados Unidos, Austrália, Japão, China, Índia, entre outros, sendo evidenciado o clima da localidade de acordo com a classificação do clima de Köppen-Geiger, os parâmetros de qualidade de água analisados em cada estudo e os principais resultados obtidos (PEEL *et al.*, 2007).

Quadro 2 – Estudos da qualidade da água escoada de telhados vegetativos em vários países, entre 2009 e 2020 (continua)

Referência	Local	Clima	Parâmetros analisados	Principais resultados
Berndtsson <i>et al.</i> (2009)	Malmö, Suécia e Fukuoka, Japão	Oceânico temperado e subtropical úmido	pH, NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , PT, P – PO ₄ ³⁻ , COD Ca ²⁺ , Cd ²⁺ , Cr, Cu Fe, K ⁺ , Mn, Pb, Zn ²⁺	As concentrações dos compostos de N e P, bem como os metais pesados foram semelhantes ao do escoamento urbano.
Beck <i>et al.</i> (2011)	Portland, Estados Unidos	Mediterrâneo fresco	NT, N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , PT	O telhado verde com solo contendo biochar reduziu a concentração de PT em relação ao telhado de controle.
Gregoire; Clausen (2011)	Mansfield, Estados Unidos	Continental úmido fresco	NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , PT, Cd ²⁺ , Cu, Cr, Hg, Pb, Zn ²⁺	O telhado verde foi sumidouro para o N – NH ₄ ⁺ , Pb e Zn ²⁺ .
Teemusk; Mander (2011)	Tartu, Tallinn, Viimsi, Luunja, Kuusalu e Otepää, Estônia	Continental úmido fresco	pH, Dur, NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , PT, DBO, DQO, SO ₄ ²⁻	A composição do substrato dos diversos telhados verdes estudados influenciou mais a qualidade da água do que a idade e localização. Nas precipitações de intensidade moderada a DQO foi maior do que intensidade forte.
Vijayaraghavan <i>et al.</i> (2012)	Singapura, Singapura	Equatorial	pH, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , N – NO ₂ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , Al, Ca ²⁺ , Cr, Fe, Li, Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Pb, Zn ²⁺ , Sal, CE, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	A água escoada dos telhados verdes aumentou a CE, Sal, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Pb, Zn ²⁺ . O telhado verde neutralizou o pH e diminuiu a concentração de Cl ⁻ e SO ₄ ²⁻ .
Vijayaraghavan; Raja (2014)	Chennai, Índia	Tropical semiúmido	pH, Al, Cd ²⁺ , Cu, Cr, Fe, Ni, Pb, Zn ²⁺	Alta concentração de Al e Fe no início do escoamento. Com o passar do tempo o telhado verde apresentou boa capacidade de adsorção dos parâmetros analisados.
Beecham; Razzaghmanesh (2015)	Adelaide, Austrália	Mediterrâneo fresco	pH, SDT, Tu, RAS, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , N – NO ₂ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , CE	Tanto os sistemas de telhados vegetativos como os telhados sem vegetação (contendo o substrato) foram fonte de poluentes. As concentrações foram menores nos vegetativos, devido à absorção de nutrientes pelas plantas.

Quadro 2 – Estudos da qualidade da água escoada de telhados vegetativos em vários países, entre 2009 e 2020 (continua)

Referência	Local	Clima	Parâmetros analisados	Principais resultados
Carpenter <i>et al.</i> (2016)	Syracuse, Estados Unidos	Continental úmido fresco	pH, COD, NT, PT	O telhado verde reteve NT e PT, no entanto, as concentrações foram maiores que a da água da chuva, principalmente durante o verão.
Buffam <i>et al.</i> (2016)	Cincinnati, Estados Unidos	Subtropical úmido	pH, SST, Tu, Dur, RAS, NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , N – NO ₂ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , Al, Ca ²⁺ , Fe, Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Zn ²⁺ , COD, CE	Telhados verdes recém-construídos apresentaram maiores concentrações de P – PO ₄ ³⁻ e de COD. A utilização de fertilizantes impactou na concentração de N – NO ₃ ⁻ .
Wang <i>et al.</i> (2017)	Tianjin, China	Continental úmido quente	pH, Tu, NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , PT, Cd ²⁺ , Cr, Cu, Mn, Pb, Zn ²⁺ , DQO	Os níveis de NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , Cd ²⁺ , Cr, Mn, Pb, Zn ²⁺ foram menores na água escoada dos telhados vegetativos do que na água da chuva, sendo maior a concentração de Cu, P – PO ₄ ³⁻ e PT.
Chen <i>et al.</i> (2018)	Taipei, Taiwan	Subtropical úmido	pH, SST, DQO, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , PT	Os telhados vegetativos apresentaram escoamento com alto teor de SST, mas que diminui com o passar do tempo. O tipo de vegetação influenciou a concentração de N – NO ₃ ⁻ e PT mais do que o tipo de substrato.
Todorov <i>et al.</i> (2018)	Syracuse, Estados Unidos	Continental úmido fresco	pH, NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , Na ⁺ , COD, CID, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	O telhado com vegetação apresentou retenção de PT, N – NO ₃ ⁻ e Cl ⁻ do que a cobertura impermeável, no entanto, apresentou lixiviação maior de P – PO ₄ ³⁻ .
Gong <i>et al.</i> (2019)	Pequim, China	Continental úmido quente	SST, DQO, NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , PT	A concentração de poluentes na água escoada dos telhados verdes foi alta, tendo apenas a redução dos SST em relação ao telhado sem vegetação e de controle.
Liu <i>et al.</i> (2019)	Lanzhou, China	Semiárido frio	SST, NT, PT	Dos parâmetros analisados, apenas o PT apresentou valores baixos.

Quadro 2 – Estudos da qualidade da água escoada de telhados vegetativos em vários países, entre 2009 e 2020 (conclusão)

Referência	Local	Clima	Parâmetros analisados	Principais resultados
Gong <i>et al.</i> (2020)	Pequim, China	Continental úmido quente	NT, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , PT	Na medida em que a profundidade do substrato aumenta, aumenta a concentração de nutrientes na água escoada. Na primavera as concentrações de NT, N – NO ₃ ⁻ e PT foram maiores.

Símbolos: pH: potencial hidrogeniônico; SST: sólidos suspensos totais; SDT: sólidos dissolvidos totais; Tu: turbidez; Dur: dureza; RAS: razão de adsorção de sódio; NT: nitrogênio total; N – NH₄⁺: nitrogênio-amoniaco; N – NO₃⁻: nitrogênio-nitrato; N – NO₂⁻: nitrogênio-nitrito; P – PO₄³⁻: fósforo-fosfato; PT: fósforo total; Al: alumínio; Cd²⁺: cádmio; Ca²⁺: cálcio; Cu: cobre; Cr: cromo; Fe: ferro; Li: lítio; Mg²⁺: magnésio; Mn: manganês; Hg: mercúrio; Ni: níquel; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Pb: chumbo; Zn²⁺: zinco; DBO: demanda bioquímica de oxigênio; DQO: demanda química de oxigênio; COD: carbono orgânico dissolvido; CID: carbono inorgânico dissolvido; Sal: salinidade; CE: condutividade elétrica; Cl⁻: cloreto; SO₄²⁻: sulfato.

Fonte: Autora.

Dentre as pesquisas realizadas no Brasil sobre o tema, os parâmetros avaliados com maior frequência foram pH, cor, sólidos dissolvidos totais, turbidez, nitrogênio, fósforo, condutividade elétrica, cloretos, sulfatos e sódio. Assim como nas pesquisas realizadas em outros países, o pH obtido nas pesquisas brasileiras em geral foi maior que 7 (SILVA, 2017; NOGUEIRA, 2018; GOMES, 2019). Os parâmetros turbidez e cor, observados por Farias (2012), foram alterados ao passar pelo telhado verde estudado, assim como verificou Savi (2015), que destacou a diferença de coloração observada entre os tipos de vegetação, sendo a vegetação do tipo *Sedum mexicanum* a com coloração mais alterada em relação limite para irrigação.

Gomes (2019) relatou o aumento dos níveis de nitrogênio na água escoada dos telhados vegetativos em comparação com o telhado de referência. No entanto, esse aumento não superou o limite estabelecido para irrigação. Já para o fósforo, os telhados verdes obtiveram concentrações superiores ao limite estabelecido, em especial o telhado com Coroa-de-Frade. Já Budel (2014), descreveu que os telhados verdes estudados apresentaram alterações na concentração de fósforo-fosfato, mas em relação às formas do nitrogênio foi observada ausência em algumas amostras ou concentrações baixas, demonstrando também no Brasil a variação dos resultados do nitrogênio, como mencionado nas pesquisas mundiais.

O Quadro 3 também apresenta alguns estudos realizados acerca da qualidade da água escoada de telhados vegetativos, com foco no Brasil, sendo destacado o clima da localidade, os parâmetros analisados e os principais resultados obtidos.

Quadro 3 – Estudos da qualidade da água escoada de telhados vegetativos no Brasil, entre 2012 e 2019 (continua)

Referência	Local	Clima	Parâmetros analisados	Principais resultados
Farias (2012)	Caruaru – PE	Semiárido quente	pH, SDT, cor, Tu, Dur, NT, PT, Fe, CE, Cl^- , OD, Temp	Alterações de cor, turbidez, nitrato e fosfato. O telhado verde com Coroa-de-Frade apresentou parâmetros mais alterados em termos qualitativos.
Lima (2013)	Caruaru – PE	Semiárido quente	pH, SDT, Tu, Dur, Temp, OD, cor, Col, $\text{N} - \text{NH}_4^+$, $\text{N} - \text{NO}_3^-$, $\text{N} - \text{NO}_2^-$, $\text{P} - \text{PO}_4^{3-}$, Fe, CE, Cl^-	Apenas cloreto, pH e CE apresentaram-se dentro dos limites permitidos para irrigação.
Budel (2014)	Curitiba – PR	Oceânico temperado	pH, Tu, OD, Temp, $\text{N} - \text{NH}_4^+$, $\text{N} - \text{NO}_3^-$, $\text{N} - \text{NO}_2^-$, $\text{P} - \text{PO}_4^{3-}$, DQO, Col	Turbidez, fosfato e microbiológicos não foram atendidos para irrigação.
Savi (2015)	Curitiba – PR	Oceânico temperado	pH, ST, cor, NT, PT	Existe diferença quanto às espécies, devido principalmente à matéria orgânica. Os índices de nitrogênio total, fósforo total e coloração alcançaram limites superiores ao exigido para irrigação.
Pessoa (2016)	Santa Maria – RS	Subtropical úmido	pH, ST, SDT, SST, Temp, cor Tu, Dur, NT, $\text{N} - \text{NO}_3^-$, $\text{N} - \text{NO}_2^-$, $\text{P} - \text{PO}_4^{3-}$, Cu, Cr, Fe, Pb, Zn^{2+} , DBO, Col, CE, Cl^- , SO_4^{2-}	Ambos os telhados verdes foram fonte de cloretos, CE, cor, DBO, dureza total, coliformes totais, fosfato, sulfato e turbidez.
Teixeira <i>et al.</i> (2016)	Porto Alegre – RS	Subtropical úmido	pH, $\text{N} - \text{NH}_4^+$, $\text{N} - \text{NO}_3^-$, $\text{N} - \text{NO}_2^-$, $\text{P} - \text{PO}_4^{3-}$, DQO, OD, Temp, Col	A concentração de nitrogênio foi maior nos telhados verdes e foram obtidos valores altos de fosfato. Os parâmetros microbiológicos foram acima do permitido.

Quadro 3 – Estudos da qualidade da água escoada de telhados vegetativos no Brasil, entre 2012 e 2019 (conclusão)

Referência	Local	Clima	Parâmetros analisados	Principais resultados
Silva (2017)	Caruaru – PE	Semiárido quente	pH, SDT, RAS, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , Ca ²⁺ , B, Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , CE, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁺ , HCO ₃ ⁻	Para ambos os telhados verdes os valores de magnésio, sulfato, fósforo e potássio apresentaram valores bem acima dos níveis aceitáveis para a irrigação.
Nogueira (2018)	Natal – RN	Tropical semiúmido	pH, Tu, CE	O telhado sem vegetação apresentou o maior valor médio do pH. Ocorreu a diminuição gradual da CE nos telhados verdes, assim como a turbidez.
Gomes (2019)	Recife – PE	Tropical úmido	pH, SST, Tu, Dur, RAS, N – NH ₄ ⁺ , N – NO ₃ ⁻ , P – PO ₄ ³⁻ , Ca ²⁺ , B, Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , CE, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁺ , HCO ₃ ⁻	Foram fontes de nitrato, amônia e boro. Todos os parâmetros para irrigação atendidos para o de Grama-esmeralda. O com Coroa-de-Frade superou o limite para potássio e fosfato.

Símbolos: pH: potencial hidrogeniônico; ST: sólidos totais; SST: sólidos suspensos totais; SDT: sólidos dissolvidos totais; Tu: turbidez; Dur: dureza; RAS: razão de adsorção de sódio; NT: nitrogênio total; N – NH₄⁺: nitrogênio-amoniaco; N – NO₃⁻: nitrogênio-nitrato; N – NO₂⁻: nitrogênio-nitrito; P – PO₄³⁻: fósforo-fosfato; PT: fósforo total; B: boro; Ca²⁺: cálcio; Cu: cobre; Cr: cromo; Fe: ferro; Mg²⁺: magnésio; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Pb: chumbo; Zn²⁺: zinco; DBO: demanda bioquímica de oxigênio; DQO: demanda química de oxigênio; CE: condutividade elétrica; Cl⁻: cloreto; SO₄²⁻: sulfato; CO₃²⁺: carbonato; HCO₃⁻: bicarbonato; Col: coliformes totais; Temp: temperatura; OD: oxigênio dissolvido.

Fonte: Autora.

2.6 TELHADOS ECOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO

Os telhados vegetativos são de interesse global pelos diversos benefícios que proporcionam, em especial pela expectativa de diminuir impactos ambientais gerados pelo crescimento populacional e pela urbanização (KOTZE *et al.*, 2020). Visando obter maior facilidade na construção desses telhados, reduzir a poluição que ocorre no processo de construção e torná-los um sistema acessível com baixo custo de implementação e de manutenção, é importante a busca de materiais alternativos. Na literatura, alguns trabalhos já abordam o tema de materiais de baixo custo para a construção do sistema de telhado vegetativo, como Vijayraghavan e Raja (2014). Os autores utilizaram substrato composto por vermiculita esfoliada,

perlita expandida, tijolo triturado, areia e turfa de coco, com o objetivo de otimizar a capacidade de adsorção do substrato associado ao uso de materiais de baixo custo.

Neste contexto, destaca-se o plástico, material que tem consumo e produção crescendo cada vez mais devido ao aumento das aplicações proporcionadas pelas suas propriedades (BABAYEMI *et al.*, 2019). De acordo com Henrich Böll Foundation (2020), mais de 400 milhões de toneladas de plásticos são produzidas anualmente no mundo. No entanto, com esse uso generalizado, é necessário encontrar soluções para uma destinação final adequada do material, levando-se em conta que os resíduos plásticos podem ser efetivamente separados dos demais resíduos para subsequente reutilização, reciclagem ou descarte adequado, e podem se tornar recursos potenciais (BABAYEMI *et al.*, 2019).

Um tipo bastante conhecido de plástico é o polietileno tereftalato (PET), polímero amplamente utilizado nas indústrias devido às suas excelentes propriedades de durabilidade, resistência, estabilidade térmica, baixa permeabilidade, facilidade de manuseio e baixo custo (ZHANG *et al.*, 2020; MARTIN *et al.*, 2021). A maioria dos resíduos gerados de PET são garrafas de refrigerantes e água mineral, recipientes para bebidas e alimentos, recipientes para líquidos e fibras têxteis (PERERA *et al.*, 2019). Nesse sentido, aliando a problemática da geração dos resíduos plásticos, em especial resíduos de PET, e a necessidade de obtenção de materiais de baixo custo, acessíveis e de fácil manutenção para o sistema de telhados vegetativos, alguns estudos estão sendo realizados com o objetivo de empregar garrafas PET no arranjo dos telhados verdes.

Cortés e Castillo (2011) realizaram um estudo, na Colômbia, de telhado verde instalado em casas com cobertura de telhas onduladas de fibrocimento, onde foram analisadas as variações térmicas do telhado. O sistema de telhado verde proposto foi desenvolvido com a utilização de garrafas PET de 3 litros que foram cortadas longitudinalmente em três orifícios, para a colocação de três mudas da vegetação, e próximo ao bico da garrafa foram feitas três perfurações, para o escoamento da água, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de telhado verde com utilização de garrafas PET em telhas de fibrocimento, na Colômbia



Fonte: Cortés e Castillo (2011).

Cortés e Castillo (2011) utilizaram como cobertura vegetal alface crespa, rabanete, cebola longa, coentro, alface lisa, espinafre e salsa, plantas que demandam baixa quantidade de nutrientes, possuem raízes rasas e crescimento rápido. Os autores verificaram que a temperatura do telhado verde obteve atenuação de 4 °C em relação ao telhado de fibrocimento e de 3 °C em relação à temperatura ambiente. Já Panziera *et al.* (2015), avaliaram o desempenho térmico de telhados verdes, na cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul, que possuíam em sua estrutura manta polietileno de alta densidade (PEAD) e partes de garrafas PET. A estrutura do telhado foi composta por manta de PEAD, manta de retenção do substrato, anéis de garrafa PET, substrato e vegetação (grama-são-carlos). Os autores compararam o módulo do telhado verde com o módulo de telhado convencional de fibrocimento e observaram que o telhado composto por PET apresentou temperatura de 3 °C menor que o telhado convencional e foi mais eficaz na redução de calor sensível durante as temperaturas máximas, resultado semelhante ao de Cortés e Castillo (2011). Os módulos desenvolvidos por Panziera *et al.* (2015) estão expostos na Figura 2.

Figura 2 – Módulos de telhados verdes com camada de garrafas PET e manta de PEAD, em Santa Maria, Rio Grande do Sul



Fonte: Panziera *et al.* (2015).

Na mesma temática, Funfgelt *et al.* (2012) avaliaram a temperatura interna de ambientes que possuíam cobertura de telhado verde com garrafas PET, em Rio do Sul, Santa Catarina. As garrafas PET utilizadas no telhado foram cortadas longitudinalmente ao meio, perfuradas na base para o escoamento da água e foram fixadas entre si através de fios de nylon. A estrutura do telhado com PET continha uma camada de drenagem composta por brita, substrato com solo e casca de arroz queimado e cobertura vegetal de gramíneas e crassuláceas. De acordo com os resultados obtidos por Funfgelt *et al.* (2012), o telhado vegetativo com garrafas PET apresentou uma variação média de temperatura interna em relação ao telhado de fibrocimento igual a 0,17 °C. O resultado obtido por Funfgelt *et al.* (2012) se aproximou ao da pesquisa realizada por Soto *et al.* (2020) que, em um projeto realizado no México, avaliaram o desempenho térmico de uma sala protótipo construída com paredes de argamassa e garrafas PET e coberta por telhado vegetativo de materiais reaproveitados. Para a cobertura foram utilizados sacos plásticos para formar uma camada impermeabilizante, duas camadas de garrafas PET, papelão, substrato de solo da região e cobertura vegetal de planta endêmica. Ao analisar as variações de temperatura do ambiente interno da sala, Soto *et al.* (2020) verificaram que a estrutura funcionou como bom isolante térmico com variação de temperatura interna entre 0,5 a 3,4 °C, enquanto a variação da temperatura externa foi de cerca de 16 °C. A cobertura vegetal do protótipo é mostrada na Figura 3.

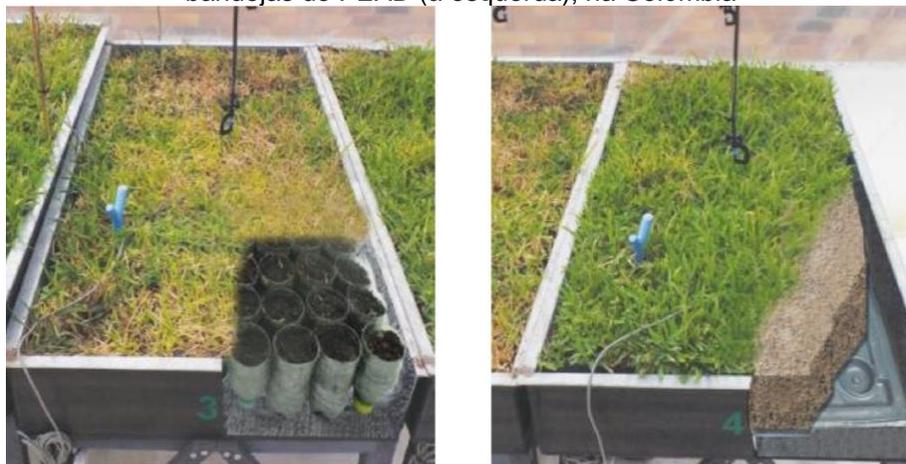
Figura 3 – Protótipo desenvolvido com paredes de garrafas PET e argamassa e cobertura de materiais reutilizáveis, no México



Fonte: Soto *et al.* (2020).

Naranjo *et al.* (2020) avaliaram o desempenho térmico de telhados verdes que utilizaram materiais reciclados e reutilizáveis na camada de drenagem do sistema, com o objetivo proporcionar economicidade e sustentabilidade da técnica. Os materiais utilizados pelos autores na camada de drenagem foram o cascalho, borracha reciclada, garrafas PET e bandejas recicladas de PEAD, e a camada vegetal foi a grama de Santo Agostinho, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Protótipos de telhados vegetativos com camada drenante de garrafas PET (à direita) e de bandejas de PEAD (à esquerda), na Colômbia



Fonte: Naranjo *et al.* (2020).

Naranjo *et al.* (2020) observaram que, durante as precipitações típicas da região, os telhados com cascalho e borracha na camada de drenagem retiveram toda a precipitação, já os telhados com garrafas PET e bandejas de PEAD retiveram metade da precipitação. Em relação ao desempenho térmico, os telhados verdes

com materiais alternativos apresentaram redução da temperatura de 10,6 a 11,7 °C durante os dias com temperaturas elevadas.

Em Caruaru, Pernambuco, Rocha (2020) avaliou o desempenho térmico de um telhado verde construídos com materiais de baixo custo. A autora utilizou na estrutura base do telhado garrafas PET de 2 litros, que foram cortadas na longitudinal e com pequenos orifícios na parte inferior da garrafa para possibilitar o escoamento da água, e as garrafas foram unidas através de clips de papel de arame de aço galvanizado. Na garrafa foram colocados o substrato e a cobertura vegetal, que foi a suculenta *Kalanchoe laetivirens*, conhecida na região por aranto e mãe-de-milhares, conforme mostrado na Figura 5.

Rocha (2020) verificou que todas as médias mensais do telhado verde ecológico apresentaram valores mais amenos ao comparar com uma cobertura de referência que não possuía o sistema vegetativo, chegando a uma redução de temperatura de cerca de 3 °C. Além disso, a autora destacou que o custo para a implementação do telhado verde foi de R\$ 18,98/m². Assim como Rocha (2020), Pereira Júnior e Silva (2011) avaliaram o custo de implementação de telhados verdes para habitações de população de baixa renda, em Betim, Minas Gerais. Para a pesquisa, os autores utilizaram garrafas PET cortadas longitudinalmente, unidas por arame, com cobertura vegetal de mudas de sedum, batata doce e amendoim e colocadas em uma cobertura com telhas de fibrocimento. Os autores verificaram que o custo para a montagem do sistema de telhados verdes com estrutura em garrafas PET foi de aproximadamente R\$ 16,00/m², enquanto empresas locais especializadas em telhados verdes cobram cerca de R\$ 75,00/m².

Figura 5 – Sistema de telhado verde ecológico desenvolvido com garrafas PET, em Caruaru, Pernambuco



Fonte: Rocha (2020).

Em relação ao desempenho hidráulico, Jobim (2013) desenvolveu módulos de telhados verdes para verificar a capacidade de retenção de água pluvial e utilizou em um dos módulos um sistema com garrafas PET de 2 litros, cortadas ao meio e com pequenos orifícios na base para o escoamento da água. Foi utilizada uma camada de argila expandida, uma manta getêxtil, areia, substrato e cobertura vegetal da espécie *Kalanchoe blossfeldiana*. Jobim (2013) observou que o coeficiente de retenção de água para o sistema com garrafas PET foi de 0,74, que corresponde a uma retenção de aproximadamente 26% da água. O módulo de telhado verde com emprego de garrafas PET é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Módulo de telhado verde desenvolvido com garrafas PET e cobertura vegetal de *Kalanchoe blossfeldiana*, em Santa Maria, Rio Grande do Sul



Fonte: Jobim (2013).

Martins e Pinto (2016), em Santa Maria, Rio Grande do Sul, também analisaram a capacidade de armazenamento de água da chuva proporcionada por um sistema de telhado verde construído com uma camada de garrafas PET, conforme Figura 7. Nessa pesquisa, as garrafas foram cortadas ao meio com uma altura de 7 cm, foi utilizada uma manta geotêxtil, substrato com solo da região e vegetação de gramíneas tipo esmeralda. As autoras puderam verificar que a taxa de infiltração do sistema de telhado verde com garrafas PET foi de 65% da precipitação, corroborando que o sistema também é eficaz comparado aos sistemas tradicionais de telhados verdes.

Figura 7 – Camada de garrafas PET para a construção de um telhado vegetativo, em Santa Maria, Rio Grande do Sul



Fonte: Martins e Pinto (2016).

Já Nagase (2020), em sua pesquisa realizada no Japão, utilizou materiais alternativos para a camada de drenagem de telhados verdes que possuíam baixo impacto ambiental. Os materiais utilizados em diferentes módulos foram tampas de garrafas PET, fundos de garrafas PET e nó de bambu, sendo a cobertura dos telhados a espécie *Zoysia japonica*. Nagase (2020) verificou que a capacidade de retenção da água do telhado com tampas de garrafas PET apresentou o maior valor, igual 31,5 L/m², em seguida o telhado composto por fundos de garrafas PET com capacidade de retenção igual a 9,8 L/m², depois veio o telhado com nós de bambu apresentando retenção de 7,2 L/m² e por fim o telhado com camada de drenagem convencional com 7,1 L/m².

Saracoglu *et al.* (2022), em estudo realizado na Turquia, utilizaram vasos plásticos transparentes para um projeto de jardim extenso de cobertura com o

objetivo de investigar o desempenho de materiais filtrantes postos entre o substrato e a camada drenante. O estudo utilizou como cobertura vegetal a *Crassula ovata*, pertencente à família das suculentas, que é adequada para o tipo de projeto proposto por ser uma planta de tamanho homogêneo, resistente à seca e não precisa de nutrientes ricos para o seu desenvolvimento. Os vasos plásticos utilizados para o plantio da cobertura vegetal possuíam abertura de diâmetro de 15 cm e abertura no fundo para escoamento conectada a garrafas plásticas com volume de 1,5 litros que coletavam a água escoada, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Projeto de jardim de cobertura utilizando vasos plásticos e materiais filtrantes alternativos, na Turquia



Fonte: Saracoglu *et al.* (2022).

Os materiais analisados na camada filtrante foram tecidos de fibra de vidro, de algodão cru e de polipropileno. Conforme resultado da pesquisa de Saracoglu *et al.* (2022), os 3 materiais removeram excesso de água sem causar perda de substrato e evitou que este se misturasse à camada de drenagem. Os autores também concluíram que em termos de temperatura o de melhor desempenho foi o tecido de algodão cru, mas em termos de capacidade de retenção de água e recomendado para o tipo de projeto foi o tecido de polipropileno.

2.7 CHUVAS INTENSAS

As chuvas intensas são as séries de chuvas anuais máximas de uma região e que, por meio da análise da frequência de chuvas, estão associadas à equação de

intensidade-duração-frequência (IDF). O estudo do comportamento das chuvas, assim como das diversas variáveis climatológicas, é de fundamental importância para auxiliar o planejamento das atividades dependentes dessas variáveis.

Neste sentido, atividades como agricultura, construção civil, transporte e turismo, que dependem direta e indiretamente do clima, necessitam de bom entendimento acerca dos fenômenos meteorológicos (RIBEIRO *et al.*, 2007; ARAÚJO, 2010). A previsão probabilística surge como ferramenta capaz de analisar o comportamento de diversas variáveis, sendo possível, através dela, determinar padrões de ocorrência e auxiliar na previsibilidade do comportamento climático de uma região (DENSKI; BACK, 2015). Segundo Tucci (2009), fenômenos como precipitação, evaporação, temperatura e vento, são considerados aleatórios e se desenvolvem no tempo e no espaço, geralmente contínuos.

Funções densidades de probabilidade são comumente utilizadas na hidrologia e climatologia, visto que fornecem uma descrição simples das probabilidades associadas às variáveis aleatórias contínuas (MONTGOMERY; RUNGER, 2010). De acordo com os parâmetros utilizados, essas funções podem assumir diferentes formas (ARAÚJO *et al.*, 2013). Dentre as principais distribuições de probabilidade utilizadas para compreender os fenômenos meteorológicos, destacam-se: Normal, Log-normal e Gumbel (RIBEIRO *et al.*, 2007; ARAÚJO *et al.*, 2013; ABREU *et al.*, 2018). Para provar a adaptação dos dados às funções de distribuição de probabilidade é necessário o uso de testes de aderência. Através de comparação entre as probabilidades empíricas de uma variável e as probabilidades teóricas estimadas pela distribuição em análise, verifica-se a possibilidade dos valores da amostra serem provenientes de uma população (DENSKI; BACK, 2015).

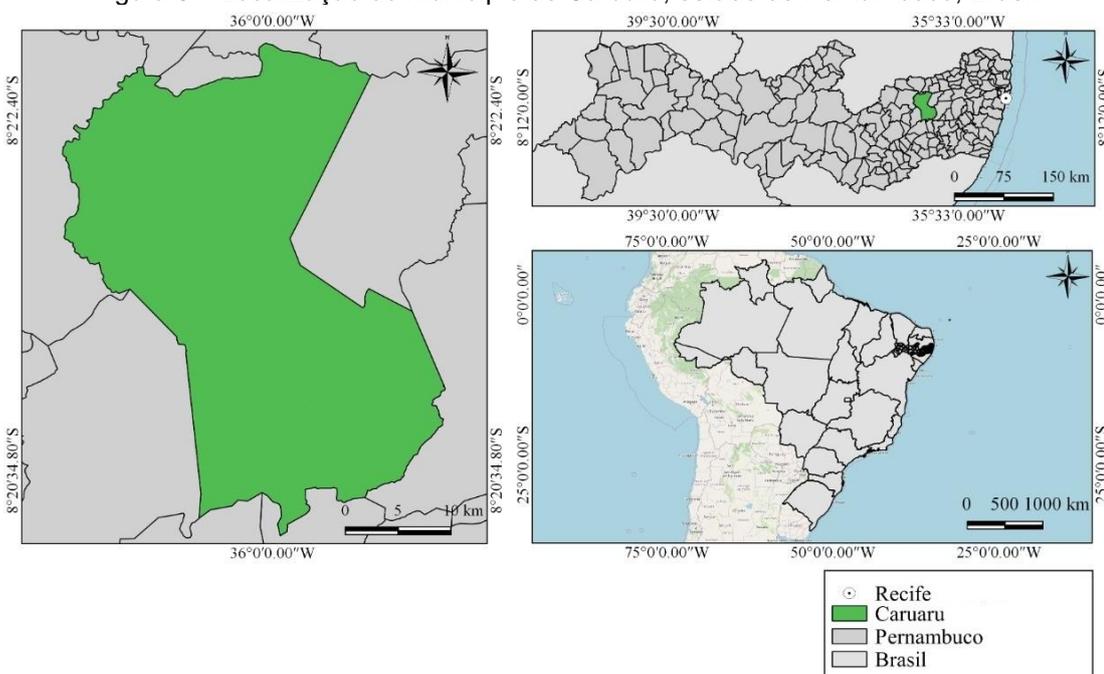
Para pesquisas com telhados verdes é de fundamental importância o conhecimento das informações de chuvas intensas da região, em especial para experimentos controlados de análise de qualidade de água, em que ocorrem simulações de precipitação. A curva IDF proporciona o conhecimento da realidade pluviométrica da região que pretende utilizar o telhado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A estrutura física desta pesquisa está instalada no Centro Acadêmico do Agreste, campus da Universidade Federal de Pernambuco. A área de estudo está localizada no município de Caruaru (Figura 9), estado de Pernambuco, região Nordeste do Brasil (coordenadas: 8° 16' 58" S; 35° 58' 33" O). Com área total de 920,610 km², o município contabilizou 314.912 habitantes em 2010, possuindo densidade demográfica de 342,07 hab/km². Para o ano 2020 a estimativa populacional foi de 365.278 pessoas (IBGE, 2010). Caruaru é constituída pelo distrito sede e distritos Carapotós, Gonçalves Ferreira e Lajedo do Cedro. Os municípios limítrofes são Bezerros e Riacho das Almas a leste, São Caetano e Brejo da Madre de Deus a oeste, Toritama, Vertentes, Taquaritinga do Norte e Frei Miguelinho a norte, e Altinho e Agrestina a sul (CPRM, 2005). Quanto à regionalização do IBGE, Caruaru está inserida na mesorregião Agreste e na microrregião Vale do Ipojuca do estado de Pernambuco.

Figura 9 – Localização do município de Caruaru, estado de Pernambuco, Brasil



Fonte: Adaptado de Silva (2021).

O relevo do nordeste brasileiro compreende a área costeira, a área da bacia do Meio Norte e o complexo embasamento cristalino, sendo nesta última onde se encontram as serras e chapadas sedimentares, destacando-se o planalto da Borborema e a chapada Diamantina (CPRM, 2005). O município de Caruaru está inserido no planalto da Borborema, formado por maciços rochosos proterozóicos, com altitude de média de 554 m acima do nível do mar (CORADIN *et al.*, 2018).

O espaço geográfico que contempla Caruaru é o Semiárido brasileiro, estando o município entre os cinco mais populosos dessa região (MEDEIROS, *et al.*, 2012). O semiárido possui como característica índices climáticos extremos, como altas insolações, altas médias de temperatura e chuvas escassas e irregulares, sendo o clima típico do Nordeste do Brasil (CORADIN *et al.*, 2018). O bioma predominante em Caruaru é a caatinga, sendo caracterizado pela presença de árvores e arbustos de pequeno porte, que suportam os longos períodos de seca da região, e de ervas, que suportam os períodos chuvosos (IBGE, 2010; CORADIN *et al.*, 2018).

3.2 SISTEMA DE TELHADO ECOLÓGICO DE BAIXO CUSTO

Os sistemas de telhados verdes convencionais são formados basicamente por uma estrutura de suporte e por quatro camadas principais, que são a camada de drenagem, a camada filtrante, a camada do substrato e a camada da cobertura vegetal. No entanto, para o desenvolvimento do sistema de telhado ecológico de baixo custo desta pesquisa foi utilizada uma composição diferente da utilizada nos telhados vegetativos convencionais.

3.2.1 Descrição da estrutura de telhado ecológico existente

No Centro Acadêmico do Agreste (CAA), campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), localizado em Caruaru, está a Unidade Experimental de Telhados Ecológicos (UETE). A UETE é composta por dois protótipos e foi desenvolvida pela equipe de Infraestrutura do campus Agreste, pelo Grupo de Pesquisa Tecnologias para o Semiárido e pela equipe de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental.

A UETE possui um telhado ecológico vegetativo e para a definição dos materiais envolvidos foi levado em consideração a necessidade do uso de materiais de baixo custo, de fácil obtenção e que proporcionassem ao sistema uma manutenção simples. Desse modo, garrafas PET de refrigerante com capacidade de 2 litros foram definidas como material da estrutura de suporte do telhado ecológico (ROCHA, 2020).

Já na escolha da vegetação foi priorizada a capacidade de adaptação ao clima semiárido da região, caracterizado pelas altas temperaturas e pela escassez hídrica. Partindo desses critérios, a espécie *Kalanchoe laetivirens*, conhecida como Aranto, foi utilizada na cobertura vegetal por ser resistente às altas temperaturas, baixa manutenção, baixo custo e vegetação com propagação de mudas pelas próprias folhas (ROCHA, 2020).

3.2.2 Composição do telhado ecológico de baixo custo

Devido à Pandemia do Novo Corona Vírus em 2020, e a consequente suspensão das atividades presenciais do Centro Acadêmico do Agreste, do campus da UFPE, em Caruaru, esta pesquisa não pôde ser realizada na UETE, como inicialmente previsto. Dessa forma, a estrutura utilizada nesta pesquisa foi uma adaptação da estudada por Rocha (2020). Além disso, alguns estudos encontrados na literatura científica que incluem o uso de garrafas PET como componente do sistema de telhado vegetativo foram utilizados como base experimental (CORTÉS e CASTILLO, 2011; FUNFGELT *et al.*, 2012; PANZIERA *et al.*, 2015; NARANJO *et al.*, 2020; ROCHA, 2020).

Baseado na pesquisa de Rocha (2020), o telhado foi composto por camada de substrato de terra tratada e cobertura vegetal de Aranto. O substrato do telhado vegetativo em estudo é composto de areia, calcário e esterco. A vegetação utilizada é da espécie *Kalanchoe laetivirens*, que faz parte do grupo das suculentas, plantas características das regiões semiáridas. A Figura 10 mostra a vegetação utilizada neste estudo.

Figura 10 – *Kalanchoe laetivirens*, conhecida como Aranto, cobertura vegetal definida para o telhado ecológico



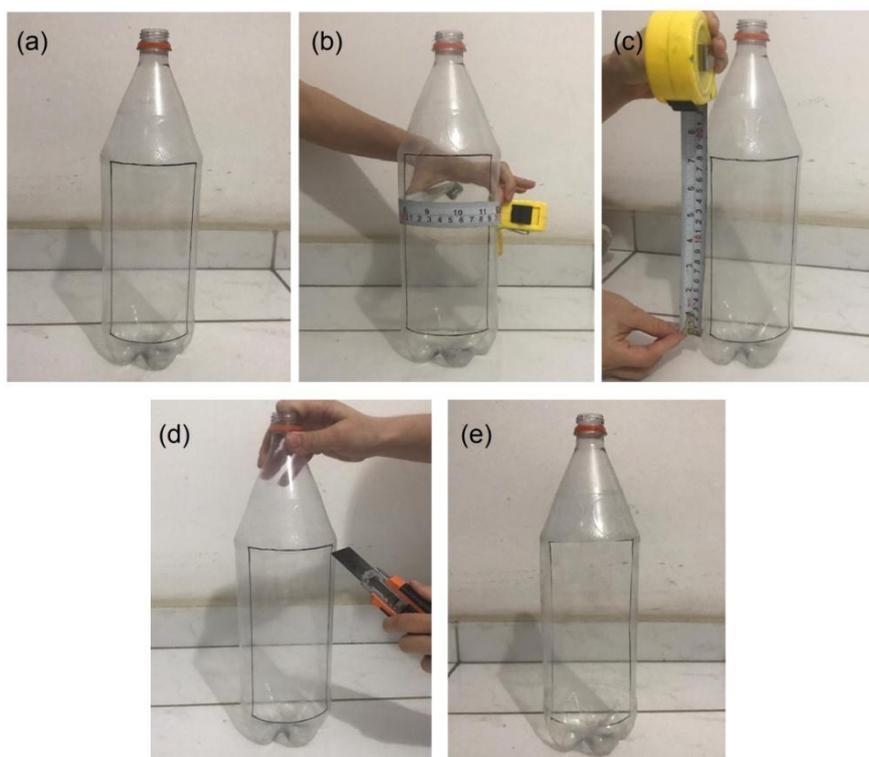
Fonte: Autora.

3.2.3 Configuração do telhado ecológico de baixo custo

Para montar a configuração adaptada do sistema de telhado ecológico, inicialmente foram utilizados os seguintes materiais: 15 garrafas PET de capacidade de 2 litros, 6 ripas de madeira de 5 cm de largura, 90 cm de comprimento e 1 cm de espessura, 2 ripas de madeira de 7 cm de largura, 55 cm de comprimento e 2 cm de espessura, 36 parafusos de 1/2" x 8 rosca ligeira, cabo de cobre revestido de PVC de 1,5 mm, tubos e conexões (14 tê e 4 joelhos de 90°) de PVC flexível de 1/2".

As garrafas PET foram lavadas com água e detergente neutro, e em seguida lavadas apenas com água corrente. Após a higienização, as garrafas foram marcadas, com auxílio de caneta hidrocor, com um retângulo de 9 cm de largura e 18 cm de comprimento, no seu sentido longitudinal, e em seguida recortadas nas marcações. A Figura 11 indica como foi realizada essa etapa.

Figura 11 – Etapas iniciais da montagem do sistema de telhado vegetativo (a) garrafa PET de 2 L marcada com retângulo (b) largura de 9 cm do retângulo marcado (c) comprimento de 18 cm do retângulo (d) marcação do retângulo sendo cortada com auxílio de estilete (e) garrafa PET de 2L com o recorte retirado



Fonte: Autora.

O arranjo das garrafas foi definido a partir da possibilidade das garrafas encaixarem diretamente em ondulações de telhas de fibrocimento, ficando, portanto, com o sentido longitudinal sendo a base do telhado. Para esta pesquisa, optou-se utilizar uma base de madeira como apoio para as garrafas, visando à facilidade de manutenção e locomoção do sistema. Para a construção da base de madeira, as 6 ripas maiores foram colocadas paralelamente distando 5 cm uma da outra e unidas pelas 2 ripas menores perpendicularmente fixadas nas extremidades por parafusos, conforme mostra a Figura 12. Além disso, em cada uma das 6 ripas paralelas foram colocados 6 parafusos para o auxílio na fixação da estrutura base às garrafas.

Figura 12 – Disposição das ripas de madeira para a formação da estrutura de apoio do telhado vegetativo



Fonte: Autora.

Com auxílio de uma furadeira, foram realizados furos nos fundos das garrafas PET para encaixar as conexões e tubos de PVC que são responsáveis por conduzir a água escoada até uma garrafa de PEAD de 5 L para a posterior coleta e análise em laboratório. Ainda com o auxílio da furadeira, foram feitos 4 orifícios na base de cada garrafa (na base oposta à abertura retangular) para que os cabos de cobre passassem por eles e unissem as garrafas. A Figura 13 mostra a etapa de colocação das conexões e tubos.

Figura 13 – Conexões e tubos de PVC fixados às garrafas



Fonte: Autora.

Em seguida, as garrafas foram posicionadas entre as ripas de madeira (3 garrafas enfileiradas e 5 garrafas lado a lado, totalizando as 15 garrafas) e unidas entre si por dois cabos de cobre revestidos em cada garrafa. Os cabos foram presos nos parafusos já fixados nas ripas e por meio dos orifícios existentes na base da

garrafa, conforme ilustra a Figura 14. A configuração completa da estrutura do sistema de telhado vegetativo com materiais sustentáveis é mostrada na Figura 15.

Figura 14 – Garrafas PET unidas entre por cabos de cobre fixados por parafusos às ripas de madeira



Fonte: Autora.

Figura 15 – Vista superior da estrutura do sistema de telhado vegetativo finalizada



Fonte: Autora.

3.2.4 Implantação da cobertura vegetal do telhado ecológico de baixo custo

A etapa de colocação do substrato e da cobertura vegetal nas garrafas PET foi realizada em novembro de 2021. Seguindo a metodologia de Rocha (2020), foi adquirido o substrato de terra tratada, em loja especializada em jardinagem, composto de esterco, calcário e areia. Além disso, foi obtido o Aranto e retirados os brotos que nascem nas folhas da planta para o plantio da cobertura vegetal no telhado ecológico. Ao implementar o substrato nas garrafas PET, conforme Figura 16, a estrutura foi colocada em uma sala no Laboratório de Química da UFPE/CAA. O local possui uma janela ampla, apresentado na Figura 17, que possibilitou a entrada da luz do sol diretamente sobre a estrutura do telhado ecológico, ao mesmo tempo em que a protegeu de intempéries não controláveis e não adequadas ao experimento, como precipitações e poluição do ar, além da proteção contra a presença de insetos e aracnídeos. Em relação ao plantio do Aranto, foi realizado no dia seguinte ao da primeira coleta (sem vegetação), na data 26/11/2021, conforme mostrada na Figura 18. Segundo Rocha (2020), inicialmente foram plantados entre 6 e 8 brotos por garrafa, no entanto, ao longo da pesquisa, a autora necessitou de espaço nas garrafas e retirou alguns brotos. Dessa forma, em adaptação ao experimento de Rocha (2020), foram plantados 4 brotos de Aranto em cada garrafa.

Figura 16 – Colocação do substrato nas garrafas PET



Fonte: Autora.

Figura 17 – Telhado ecológico localizado do Laboratório de Química da UFPE/CAA



Fonte: Autora.

Figura 18 – Plantio da cobertura vegetal de Aranto



Fonte: Autora.

3.3 CUSTO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO TELHADO ECOLÓGICO

Os materiais utilizados para a elaboração do telhado ecológico com cobertura vegetal de Aranto estão dispostos na Tabela em quantidade e valores médios encontrados no mercado. Esses valores são apresentados de forma a simular o preço total do sistema, visto que apenas o substrato de terra tratada e a planta foram

comprados. No entanto, as mudas de Aranto são facilmente encontradas na região, como nos parques ecológicos da cidade. As garrafas PET foram sendo guardadas ao acabar o conteúdo original para o reuso na estrutura do telhado. Os parafusos, ripas de madeira, cabos, tubos e conexões foram obtidos por meio de doação. Vale destacar que as ripas de madeira, os cabos e parafusos para a fixação das garrafas nas ripas possuíram a finalidade de estrutura de apoio para a locomoção do telhado ecológico.

Tabela 4 – Simulação de custos dos materiais utilizados para a elaboração do telhado ecológico com Aranto, baseado nos valores praticados no comércio varejista local em 2020

Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Preço total
Garrafa PET de 2 litros	un.	15	R\$ 1,15	R\$ 17,25
Vegetação de <i>Kalanchoe laetivirens</i> (Aranto)	un.	1	R\$ 7,00	R\$ 7,00
Substrato de terra tratada	kg	5	R\$ 1,00	R\$ 5,00
Ripas de madeira (5 cm x 90 cm x 1 cm)	un.	6	R\$ 1,30	R\$ 7,80
Ripas de madeira (7 cm x 55 cm x 2 cm)	un.	2	R\$ 1,80	R\$ 3,60
Parafusos	un.	36	R\$ 0,56	R\$ 20,16
Cabo flexível de 1,5 mm	m	1,5	R\$ 0,55	R\$ 0,83
Tubos	m	2,5	R\$ 10,90	R\$ 27,25
Conexão tê de 1/2"	un.	14	R\$ 1,06	R\$ 14,84
Conexão joelho de 90° 1/2"	un.	4	R\$ 2,50	R\$ 10,00
			Total	R\$ 113,73

Fonte: Autora.

3.4 DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE SIMULADA DE CHUVA

A determinação da intensidade da chuva é realizada através da utilização da curva IDF, que, de acordo com Tucci (2004), é expressa pela Equação 2.

$$I = \frac{a \cdot T^b}{(t+c)^d} \quad (2)$$

Em que I (mm/h) é a intensidade da chuva, T (anos) é o tempo de retorno da chuva, t (min) é a duração da chuva e as variáveis a, b, c e d são determinadas a partir dos dados históricos das precipitações da região.

Para esta pesquisa foi utilizada a equação obtida no estudo de Silva (2017), que utilizou o método de Gumbel para análise pluviométrica do município de Caruaru. Os dados pluviométricos foram obtidos a partir do sistema de

monitoramento pluviométrico da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). A APAC foi criada com a intenção de executar a Política Estadual de Recursos Hídricos, bem como realizar o monitoramento do tempo e clima no estado de Pernambuco (PERNAMBUCO, 2010). Foram utilizados os dados da Estação 24, que possui instrumentos com vários sensores, dentre eles o responsável pela medida da quantidade de precipitação, o pluviômetro (APAC, 2021). A partir do sistema de monitoramento pluviométrico da APAC, é possível obter os dados referentes às precipitações diárias da Estação e às precipitações acumuladas no mês, sendo o valor apresentado em milímetro (mm).

A partir da pesquisa de Silva (2017), para o período de chuvas de 1969 a 2017, foi obtida a Equação 3.

$$I = \frac{439,883 \cdot T^{0,298}}{(t+3,05)^{0,876}} \quad (3)$$

Segundo Silva (2017), foi confirmada a aderência com o teste de Kolmogorov-Sminorv (KS) ao nível de significância de 5%.

A partir da curva IDF determinada na Equação 3, considerando o tempo de retorno de 15 anos e duração de 60 minutos, foi obtida uma intensidade de 26 mm/h, conforme Silva (2017). Considerando a área do telhado ecológico desta pesquisa (0,495m² considerando a área total e 0,461 m² a área das garrafas) e a intensidade da chuva (26 mm/h), apresentou como resultado uma vazão de 12 L/h. Essa vazão foi controlada com a utilização de garrafas PET de 1 L, com um pequeno orifício na tampa. Segundo Akther *et al.* (2021), a utilização de água deionizada ou destilada evita a introdução de poluentes adicionais, dessa forma, foi utilizada água destilada na simulação da chuva. Além disso, o processo de simulação da chuva foi monitorado com cronômetro para que fosse efetuado no tempo correto.

3.5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

As análises dos parâmetros de qualidade da água da chuva e da água escoada dos telhados ecológicos vegetativos foram realizadas no Laboratório de Química (LQ), pertencente ao campus da Universidade Federal de Pernambuco do Centro Acadêmico do Agreste (UFPE/CAA). Os parâmetros físico-químicos

investigados foram cor, sólidos dissolvidos totais, turbidez, condutividade elétrica, pH, nitrogênio-amoniaco, nitrogênio-nitrato, fósforo-fosfato, cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, sulfato, carbonato e bicarbonato. As amostras de água coletadas foram analisadas no período de novembro de 2021 a maio de 2022, através de coletas espaçadas em intervalos variados de 3 a 4 semanas, para analisar os parâmetros conforme o desenvolvimento da vegetação.

Os parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório foram determinados a partir da metodologia de referência *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2018). Condutividade elétrica, cor e pH foram determinados com equipamentos específicos. Os parâmetros dureza total, fósforo, fosfato, nitrogênio-amoniaco, nitrogênio-nitrito, nitrogênio-nitrato, ferro total e sulfato foram determinados a partir de kits da empresa Alforkit (Figura 19) e lidos no espectrofotômetro em absorbância, tendo os resultados sido convertidos em concentração de mg/L após a elaboração da curva padrão de cada parâmetro. A Tabela 5 apresenta o parâmetro investigado e o respectivo método de determinação.

Figura 19 – Kits da empresa Alforkit para análise dos parâmetros físico-químicos da água escoada do telhado ecológico



Fonte: Autora.

Tabela 5 – Parâmetros físico-químicos a analisar da água escoada do telhado ecológico

Parâmetro	Equipamento/Método
Cor	Colorímetro
Sólidos Dissolvidos Totais	Gravimetria
Turbidez	Turbidímetro
Condutividade Elétrica	Condutivímetro elétrico
pH	pHmetro
Amônia	Nessler
Nitrato	Brucina
Nitrito	Alfaftilamina

Fósforo-Fosfato	Vanadomolibdico
Cálcio	Titulação com EDTA
Magnésio	Titulação com EDTA
Dureza total	Titulação com EDTA
Cloreto	Titulação com nitrato de prata
Sulfato	Sal de bário
Carbonato	Volumetria
Bicarbonato	Volumetria

Fonte: Autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISES DA QUALIDADE DA ÁGUA DO TELHADO ECOLÓGICO DE BAIXO CUSTO

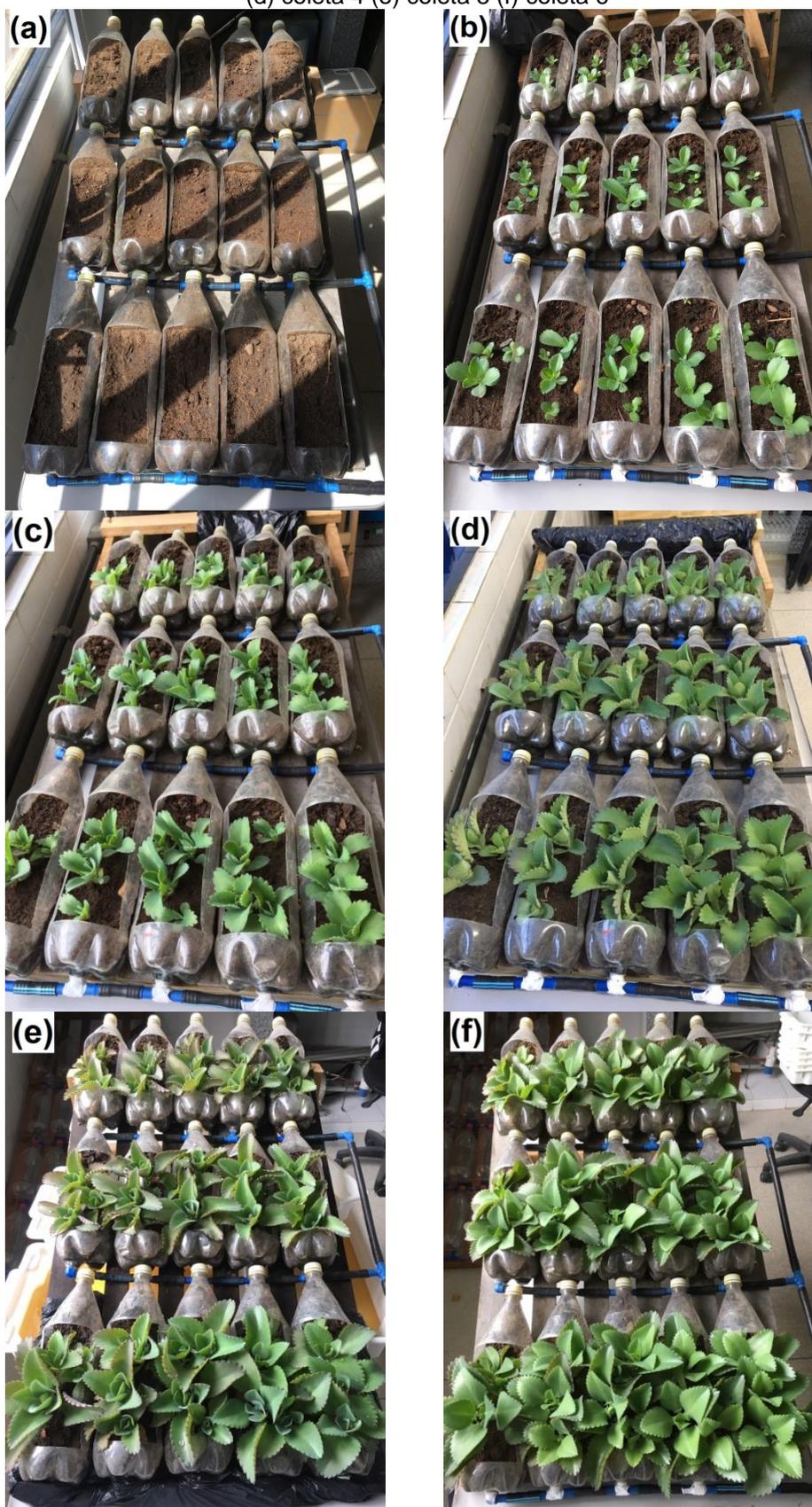
Foram analisados os parâmetros físico-químicos da água escoada do telhado ecológico desde a colocação do substrato de terra tratada, seguido do plantio dos brotos de Aranto até seis meses de desenvolvimento da planta. As coletas foram realizadas nos dias 25 de novembro de 2021 (coleta 1), 29 de dezembro de 2021 (coleta 2), 27 de janeiro de 2022 (coleta 3), 17 de fevereiro de 2022 (coleta 4), 12 de maio de 2022 (coleta 5) e 26 de maio de 2022 (coleta 6). As análises dos parâmetros foram feitas no dia da respectiva coleta e no dia subsequente à coleta. A Figura 20 apresenta o estágio de desenvolvimento que se encontrava a cobertura vegetal de Aranto nos dias de cada coleta. Os resultados obtidos nas análises dos parâmetros de qualidade da água estão dispostos na Tabela 6.

4.1.1 Cor

A água escoada é analisada quanto a sua cor aparente, analisada da forma em que é coletada, e quanto a cor verdadeira, que passa por um processo de filtragem para ser analisada. A cor é um parâmetro que contém influência principalmente do substrato do telhado ecológico, desse modo, em todas as coletas realizadas a cor apresentou-se em tons de marrom e de amarelo escuro, conforme Figuras 21 e 22. Por conter influência principalmente do substrato, a análise realizada quando ainda não havia vegetação, apenas o substrato de terra tratada, foi a que apresentou o maior valor da cor aparente, 3441 uC, e da cor verdadeira, 2600 uC, conforme Figuras 23 e 24.

Notou-se que o parâmetro diminuiu ao longo das coletas, fato que pode ser associado à presença da cobertura vegetal de Aranto se desenvolvendo. No entanto, esses os valores foram maiores do que dos estudos realizados por Farias (2012) e na mesma faixa dos realizados por Lima (2013), que analisaram a cor da água escoada de telhados verdes de Grama de burro e Coroa-de-Frade, e Babosa e Coroa-de-Frade, respectivamente.

Figura 20 – Desenvolvimento da vegetação nos dias das coletas (a) coleta 1 (b) coleta 2 (c) coleta 3 (d) coleta 4 (e) coleta 5 (f) coleta 6



Fonte: Autora.

Tabela 6 – Resultados obtidos para os parâmetros analisados da água escoada do telhado ecológico de baixo custo com vegetação de Aranto no período de coleta do dia 25/11/2021 ao dia 26/05/2022

Parâmetros	Unidade	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Coleta 4	Coleta 5	Coleta 6
Cor Aparente	uC	3441	2419	3077	2970	2007	1631
Cor Verdadeira	uC	2600	1929	2568	2473	1637	1251
Turbidez	NTU	51,70	20,80	14,70	18,60	16,50	32,20
Temperatura	°C	23,00	26,30	24,00	24,70	25,30	22,00
pH	-	5,66	6,20	6,43	6,68	6,40	6,65
Condutividade Elétrica	dS/m	2,200	2,330	1,183	0,472	0,281	0,164
SDT	mg/L	3838	2108	910	720	668	627
Alcalinidade Total	mg/L de CaCO ₃	52,89	49,94	50,94	52,94	52,44	53,94
Cloretos	mg/L de Cl ⁻	539,81	448,25	260,44	95,16	57,60	40,07
Dureza Total	mg/L de CaCO ₃	886	455	205	92	75	40
Cálcio	mg/L de CaCO ₃	426	210	130	49	30	10
Magnésio	mg/L de CaCO ₃	460	245	75	43	45	30
Ferro Total	mg/L	4,01	2,59	3,00	3,21	2,13	2,07
Fósforo	mg/L	35,96	33,37	39,45	39,53	37,32	24,98
Fosfato	mg/L	64,91	59,43	54,69	51,58	69,13	70,02
Sulfato	mg/L	464,78	300,33	262,11	155,44	91,89	82,56
Amônia	mg/L	56,54	9,27	14,25	7,93	18,26	5,34
Nitrito	mg/L	60,78	19,75	20,47	16,40	13,35	10,74
Nitrato	Abs.	1,107	0,758	1,675	0,883	0,427	0,307

Fonte: Autora.

Figura 21 – Escoamento da água do telhado ecológico durante a coleta 1



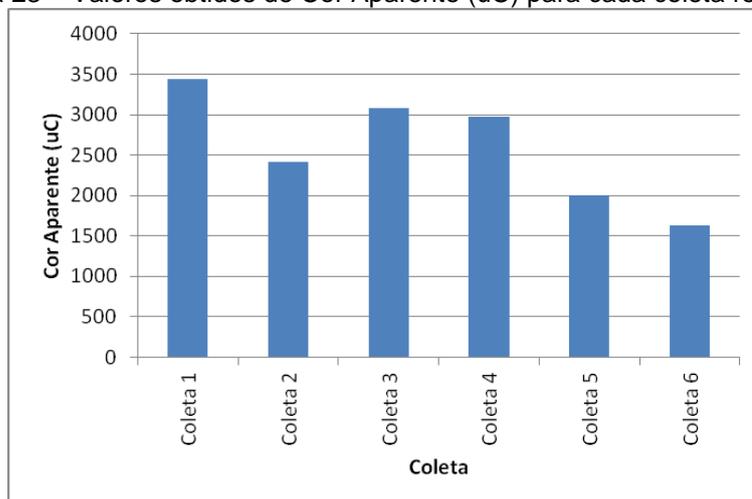
Fonte: Autora.

Figura 22 – Escoamento da água do telhado ecológico durante a coleta 6



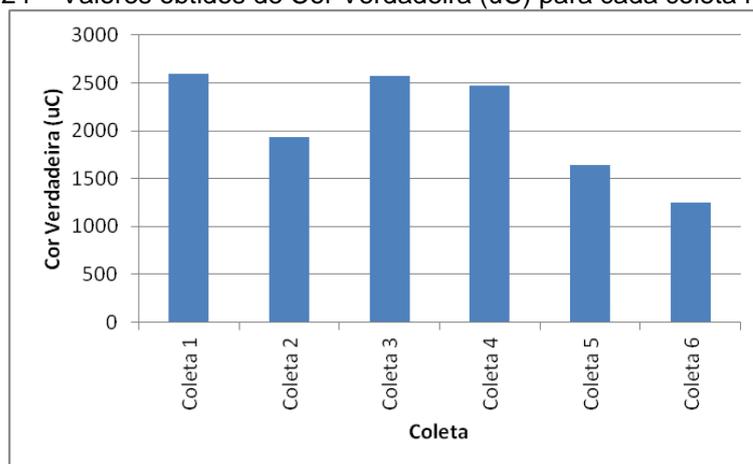
Fonte: Autora.

Figura 23 – Valores obtidos de Cor Aparente (uC) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

Figura 24 – Valores obtidos de Cor Verdadeira (uC) para cada coleta realizada

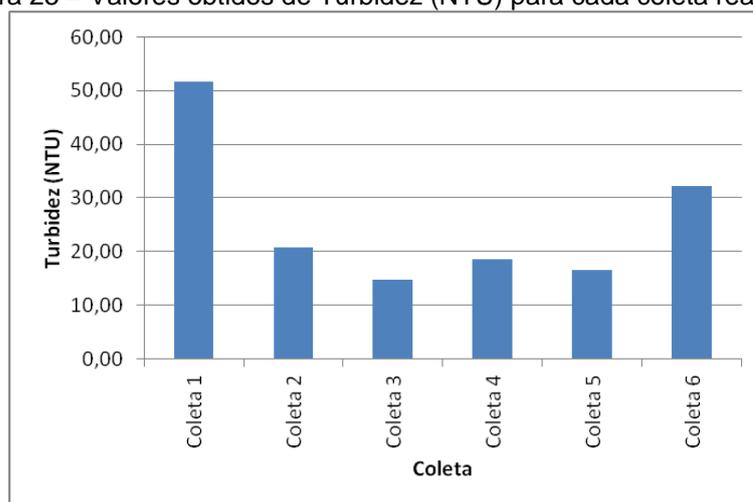


Fonte: Autora.

4.1.2 Turbidez

A turbidez é um parâmetro que avalia a quantidade de luz capaz de atravessar a água sem ser espalhada por partículas (HASHEMI *et al.*, 2015). Dessa forma, assim como a cor, a turbidez é alterada devido à presença de sólidos lixiviados do substrato e que deixam a água escoada do telhado ecológico turva. Os dados obtidos para o parâmetro turbidez estão dispostos na Figura 25.

Figura 25 – Valores obtidos de Turbidez (NTU) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

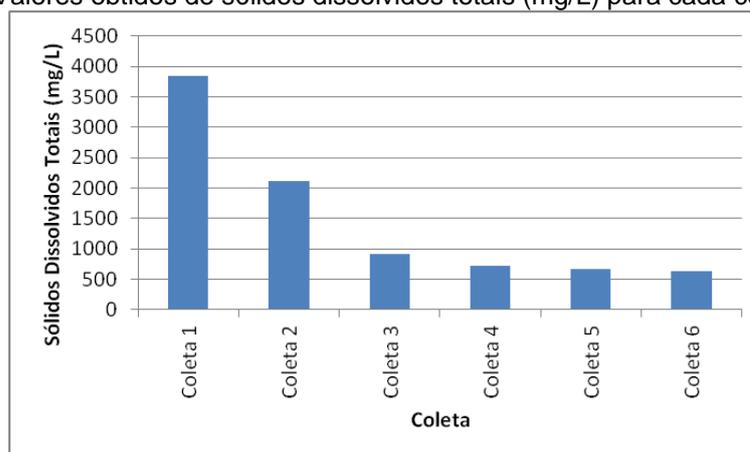
O maior valor observado foi de 51,70 NTU na coleta 1, justificado por ser o dia da primeira coleta realizada e por isso conter maior volume de partículas sólidas na água escoada. Acerca do alto valor obtido na coleta 6, 32,20 NTU, não foi identificada relação com variação dos demais parâmetros analisados.

Em comparação aos valores obtidos por Lima (2013), no geral, Aranto apresentou melhores resultados em relação à Babosa (maior valor igual a 327 NTU) e à Coroa-de-Frade (maior valor igual a 90 NTU). Da mesma forma, em relação aos resultados de Gomes (2019), a média dos valores do Aranto, $25,75 \text{ NTU} \pm 12,9 \text{ NTU}$ (média \pm desvio padrão), foi melhor em comparação à Coroa-de-Frade ($277,7 \text{ NTU} \pm 39,2 \text{ NTU}$), já em relação à Grama esmeralda ($12,7 \text{ NTU} \pm 5,3 \text{ NTU}$).

4.1.3 Sólidos dissolvidos totais

Os níveis de sólidos dissolvidos totais do escoamento do telhado ecológico variaram de 3838 mg/L na primeira coleta a 627 mg/L na última coleta. Resultados semelhantes foram obtidos por Lima (2013), variando de 4060 mg/L a 702 mg/L para o telhado com Babosa e de 2004 mg/L a 820 mg/L para o telhado com Coroa-de-Frade. Observa-se na Figura 26 que ao longo do tempo os níveis de sólidos dissolvidos foram reduzidos significativamente. Este parâmetro avalia as partículas de substrato que acompanham a água escoada do telhado, sendo importante utilizar uma camada filtrante pra reduzir ainda mais a perda do substrato e consequentemente diminuir a quantidade de sólidos no escoamento do telhado ecológico (LIU *et al.*, 2019).

Figura 26 – Valores obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para cada coleta realizada

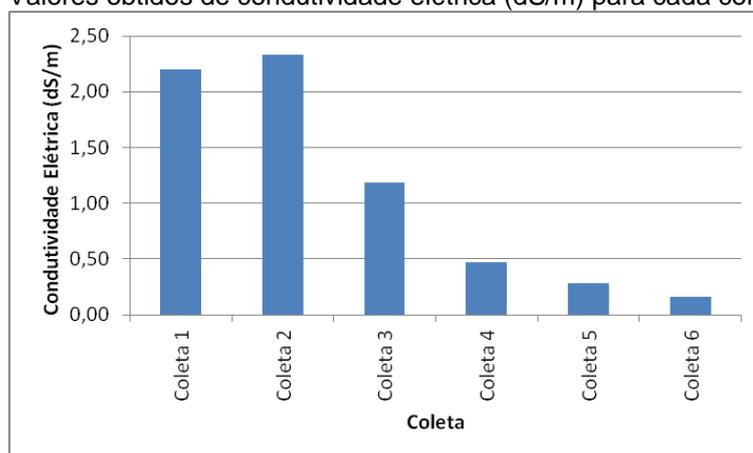


Fonte: Autora.

4.1.4 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é o parâmetro que considera a quantidade sais que estão presentes na água escoada, sendo um dos parâmetros que caracterizam a salinidade (ALMEIDA, 2010). Nas análises realizadas, foram obtidos valores entre 2,33 dS/m e 0,164 dS/m, com a tendência de diminuição dos valores ao longo do desenvolvimento da cobertura vegetal e das simulações de chuva, que acabam por diminuir a quantidade de sais presentes no substrato, conforme apresentado na Figura 27. Os dados obtidos foram semelhantes aos de Lima (2013), os quais inicialmente apresentam condutividade maior inicialmente e que foram reduzindo ao longo das coletas. Para o telhado com Coroa-de-Frade, Lima (2013) obteve inicialmente condutividade igual 1,99 dS/m e na última análise obteve o valor igual a 0,60 dS/m. Para o telhado com Babosa, Lima (2013) obteve valores que variaram de 1,34 dS/m a 0,01 dS/m. Já Farias (2012), apresentou valores de condutividade elétrica para o telhado de Grama de burro variando de 0,388 dS/m a 0,082 dS/m, e para o telhado com Coroa-de-Frade valores entre 0,245 dS/m e 0,131 dS/m, não sendo observada alteração relacionada ao longo do tempo.

Figura 27 – Valores obtidos de condutividade elétrica (dS/m) para cada coleta realizada



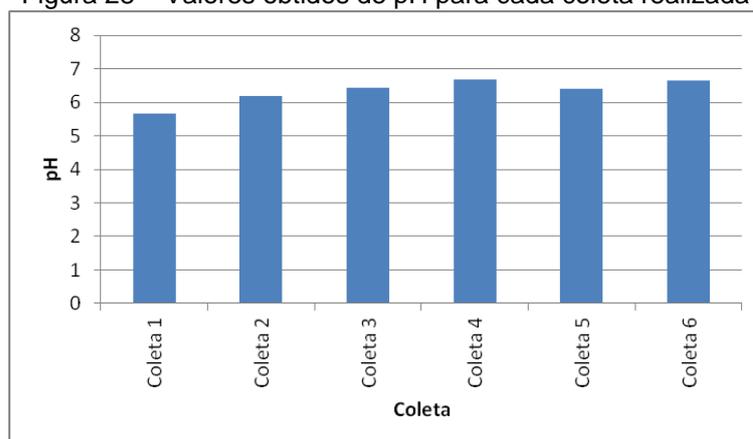
Fonte: Autora.

4.1.5 pH

Os valores obtidos para o pH estão dispostos na Figura 28, sendo observado que os valores ficaram cada vez mais próximos à neutralidade. É possível verificar que o pH apresentou como menor valor, ou seja, mais ácido, o de 5,66 e o maior

valor, mais próximo à neutralidade, de 6,68. A faixa de valores próxima à neutralidade também foi observada nos estudos de Farias (2012), Lima (2013), Silva (2017) e Gomes (2019). A neutralização do pH da água escoada, devido à presença da vegetação e do substrato, é uma importante função dos telhados ecológicos observada em diversos estudos (BERNDTSSON, 2010; VIJAYARAGHAVAN *et al.*, 2012; CHEN *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2022; GOMES *et al.*, 2023).

Figura 28 – Valores obtidos de pH para cada coleta realizada

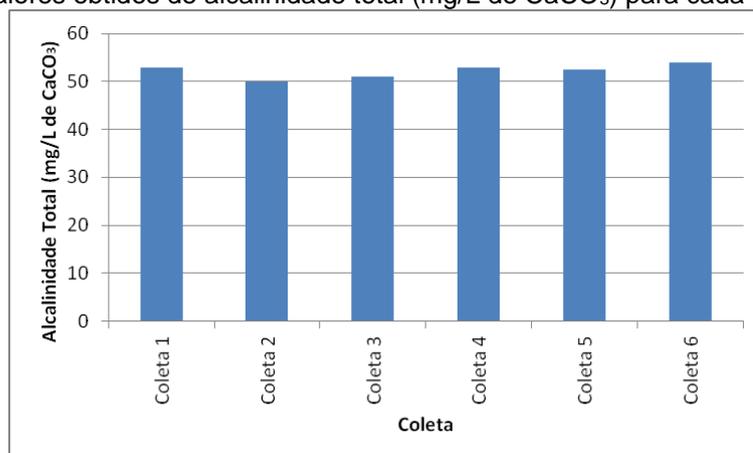


Fonte: Autora.

4.1.6 Alcalinidade total

A alcalinidade total é um parâmetro da qualidade da água que está diretamente relacionado com o pH. Em todas as análises foram obtidos valores para a alcalinidade total abaixo de 60,00 mg/L de CaCO_3 , conforme a Figura 29. A partir dos dados analisados, foi possível verificar que não ocorreram variações significativas entre os dias de coletas, tendo a média de 52,18 mg/L de $\text{CaCO}_3 \pm 1,34$ mg/L de CaCO_3 . Esses valores foram semelhantes aos obtidos por Farias (2012), referentes aos telhados de Grama de burro e de Coroa-de-Frade, que, com exceção de algumas coletas pontuais, apresentaram a alcalinidade total abaixo de 60 mg/L de CaCO_3 . No entanto, nas análises realizadas por Lima (2013), a alcalinidade ficou para ambos os telhados, no geral, acima de 100 mg/L de CaCO_3 .

Figura 29 – Valores obtidos de alcalinidade total (mg/L de CaCO₃) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

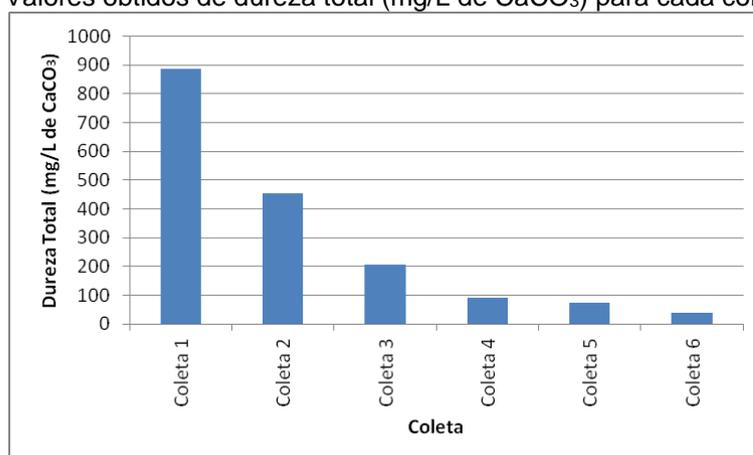
4.1.7 Dureza total

A dureza total define a presença de cátions de cálcio e de magnésio na água, justificada principalmente pelo substrato do telhado. De acordo com os valores obtidos para este parâmetro (Figura 30), é possível verificar que a coleta 1, representando o telhado apenas com o substrato, apresentou maior valor para dureza total, 886 mg/L de CaCO₃. A partir da coleta 2, referente à primeira coleta com a vegetação, foi observada variação significativa, diminuindo para aproximadamente metade do valor inicial de dureza, 443 mg/L de CaCO₃. Na análise seguinte, coleta 3, novamente ocorreu variação significativa, tendo o valor de dureza igual a 205 mg/L de CaCO₃, até atingir o valor de 40 mg/L de CaCO₃, na última análise. Conseqüentemente, os valores obtidos na análise de cálcio e magnésio seguiram padrão semelhante de diminuição (Figuras 31 e 32), exceto na coleta 5, que obteve o valor de 30 mg/L de CaCO₃ para o cálcio e de 45 mg/L de CaCO₃ para o magnésio, sendo o valor de magnésio superior ao da coleta antecedente (43 mg/L de CaCO₃ para magnésio).

Farias (2012) obteve valores de dureza entre 247,50 e 61,22 mg/L de CaCO₃ para a água excedente do telhado com grama de burro e entre 166,32 e 59,4 mg/L de CaCO₃ para com Coroa-de-Frade. Já Lima (2013), encontrou valores entre 319,84 e 91,09 mg/L de CaCO₃ para o telhado com Babosa e entre 514,17 e 93,12 mg/L de CaCO₃ para o com Coroa-de-Frade. Ambos os resultados não apresentaram variações decrescentes ao longo do tempo, diferentemente do encontrado nesta avaliação com o Aranto. Em relação ao cálcio e magnésio, Silva

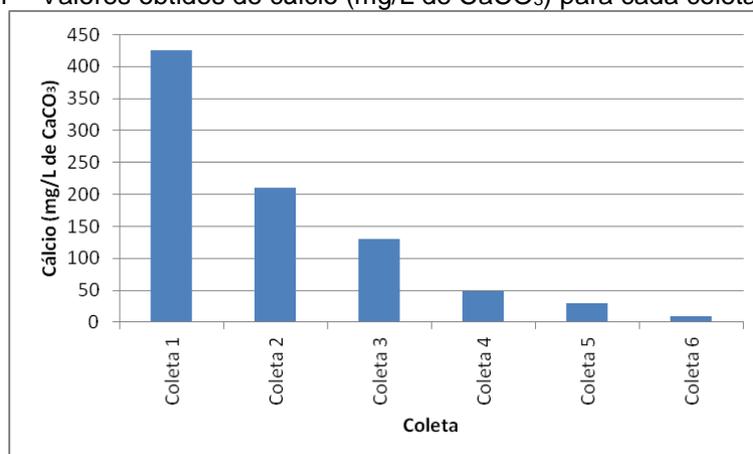
(2017) obteve valores entre 13,4 e 14,8 mg/L de CaCO_3 e entre 356,1 e 152,8 mg/L de CaCO_3 , para cálcio e magnésio respectivamente. Dessa forma, é possível destacar o desempenho do telhado ecológico com vegetação de Aranto em comparação aos estudos mencionados.

Figura 30 – Valores obtidos de dureza total (mg/L de CaCO_3) para cada coleta realizada



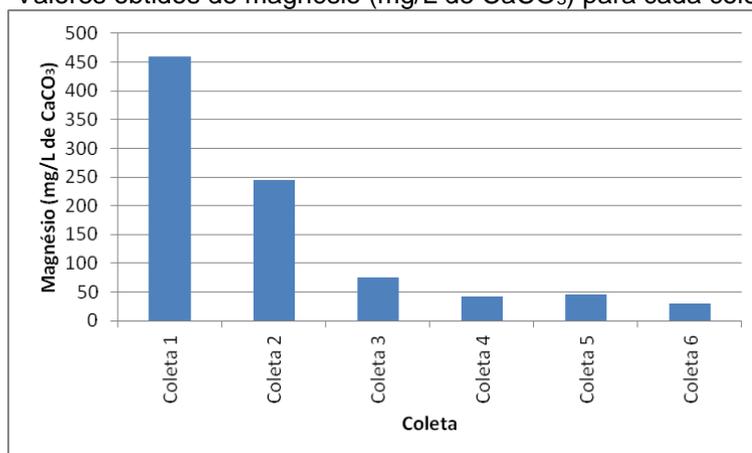
Fonte: Autora.

Figura 31 – Valores obtidos de cálcio (mg/L de CaCO_3) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

Figura 32 – Valores obtidos de magnésio (mg/L de CaCO₃) para cada coleta realizada



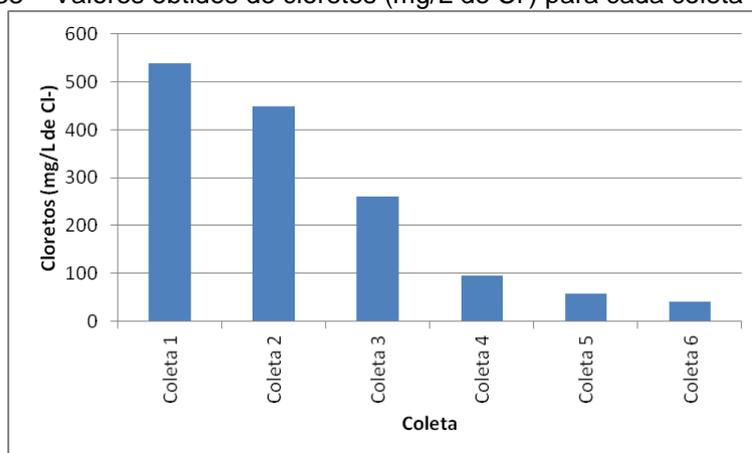
Fonte: Autora.

4.1.8 Cloretos

Os dados observados para o parâmetro cloreto variaram entre 539,81 mg/L de Cl⁻ e 40,07 mg/L de Cl⁻, apresentando diminuição ao longo das análises, conforme Figura 33. De acordo com Todorov *et al.* (2018), essa diminuição se deve ao período de desenvolvimento da vegetação, que auxilia na retenção dos íons de cloreto geralmente presentes nos substratos.

Os dados das análises realizadas nas coletas 5 e 6 foram os menores, 57,60 mg/L de Cl⁻ e 40,07 mg/L de Cl⁻, sendo estes mais semelhantes aos valores obtidos por Lima (2013) e Gomes (2019).

Figura 33 – Valores obtidos de cloretos (mg/L de Cl⁻) para cada coleta realizada



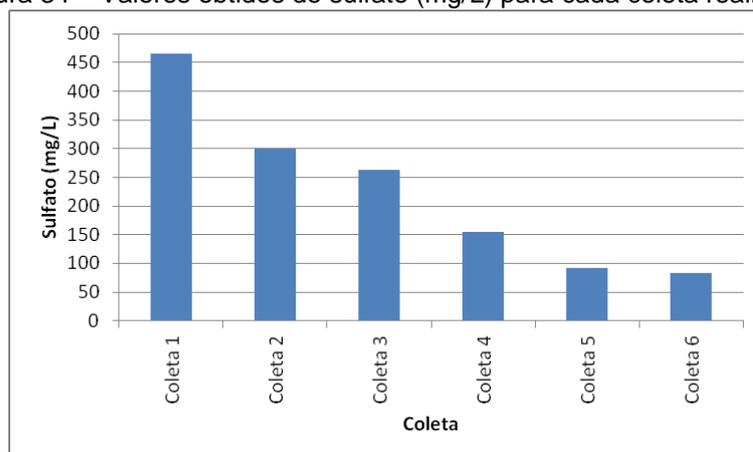
Fonte: Autora.

4.1.9 Sulfatos

As análises referentes ao sulfato variaram de 464,78 mg/L, na coleta 1, a 82,56 mg/L, na coleta 6. Esses valores foram diminuindo gradativamente ao longo das coletas, corroborando o fato observado por Todorov *et al.*(2018), que destacou que a concentração de sulfatos na água drenada pelos telhados com vegetação diminuíram ao longo do tempo.

A Figura 34 apresenta os valores obtidos em cada coleta, sendo possível verificar que foram valores bem abaixo dos valores encontrados por Silva (2017), que obteve 1970 mg/L para o telhado com Babosa e 962 mg/L para o telhado com Coroa-de-Frade.

Figura 34 – Valores obtidos de sulfato (mg/L) para cada coleta realizada

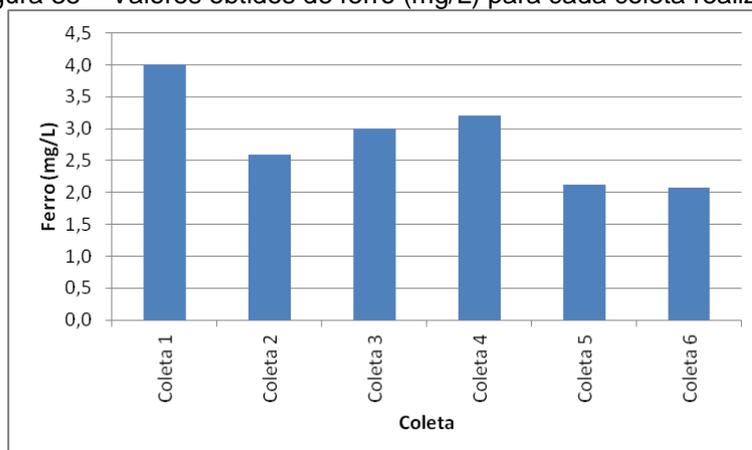


Fonte: Autora.

4.1.10 Ferro

A principal fonte de ferro nos telhados ecológicos é o substrato, visto que é um dos elementos mais comuns da crosta terrestre (VIJAYARAGHAVAN; RAJA, 2014). Dessa forma, em todas as coletas analisadas o ferro foi detectado e atingiu valor médio igual a 2,83 mg/L e desvio padrão de 0,73 mg/L. O maior valor observado foi no dia da primeira análise, coleta 1, com concentração de ferro igual a 4,01 mg/L. De acordo com as análises, conforme Figura 35, o telhado ecológico de Aranto apresentou comportamento de fonte de ferro, assim como os resultados obtidos por Farias (2012) e Lima (2013).

Figura 35 – Valores obtidos de ferro (mg/L) para cada coleta realizada



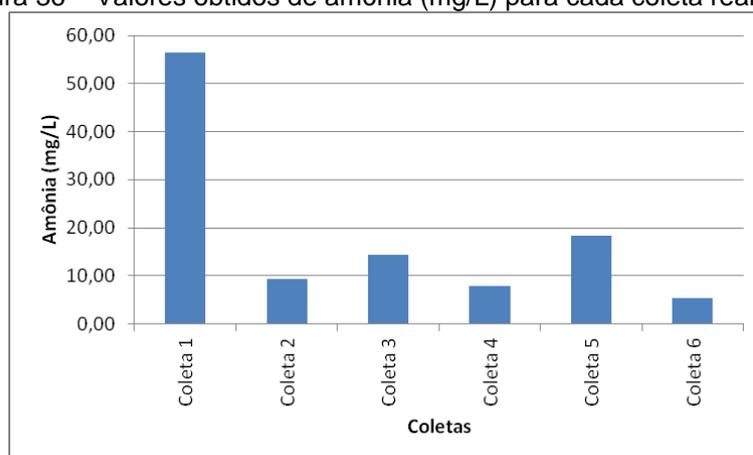
Fonte: Autora.

4.1.11 Nitrogênio

O nitrogênio e suas formas, amônia, nitrato e nitrito, podem ser relacionados a diversos fatores, como tipo de substrato, tipo de vegetação e idade do telhado, sendo a vegetação a responsável principal pela retenção dos nutrientes (BERNDTSSON, 2010; HASHEMI *et al.*, 2015; CARPENTER *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2018).

Conforme observado na Figura 36, a amônia apresentou variação de valores entre 56,54 mg/L e 5,34 mg/L, coleta 1 e coleta 6, respectivamente. Assim como a maioria dos parâmetros analisados, o maior valor foi obtido na coleta 1 e apresentou diminuição nas demais coletas, devido à presença da vegetação e à lixiviação do nitrogênio na forma de amônia. Com exceção da coleta 1, as coletas apresentaram valor médio igual a 11,01 mg/L e desvio padrão de 5,19 mg/L. Estes resultados estão próximos aos valores obtidos por Lima (2013), que obteve média de 19,37 mg/L para o telhado com Babosa e 12,03 mg/L para o telhado com Coroa-de-Frade. No entanto, em comparação aos valores observados por Farias (2012) e Silva (2017), os resultados desta pesquisa foram altos, tendo como possível relação à idade do substrato dos telhados analisados, já que, assim como Lima (2013), o substrato utilizado nessa pesquisa estava na sua idade inicial.

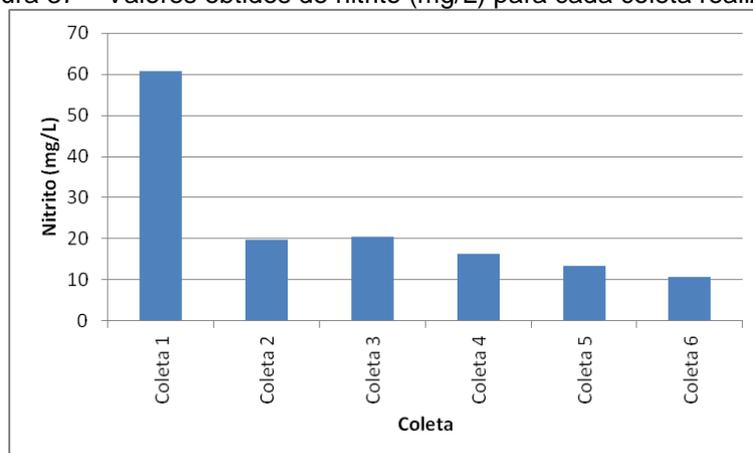
Figura 36 – Valores obtidos de amônia (mg/L) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

Em relação ao nitrito, os valores observados estão apresentados na Figura 37. Destaca-se que a primeira análise, coleta 1, foi a que apresentou maior concentração, igual a 60,78 mg/L, visto que ainda não havia vegetação e o substrato foi considerado fonte de nitrito. No entanto, essa concentração diminuiu para 19,75 mg/L na segunda análise, que já havia o Aranto, e atingiu o menor valor, igual a 10,74 mg/L, na última análise. No entanto, as análises realizadas por Farias (2012) e Lima (2013) apresentaram valores para o nitrito bem inferiores ao desta pesquisa, tendo como maior valor 1,47 mg/L e 1,64 mg/L, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída à vegetação existente nos telhados verdes analisados que já estavam desenvolvidas. Apesar disso, pode-se observar que o plantio do Aranto foi fundamental para a diminuição do nitrito presente na água escoada do telhado ecológico desta pesquisa.

Figura 37 – Valores obtidos de nitrito (mg/L) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

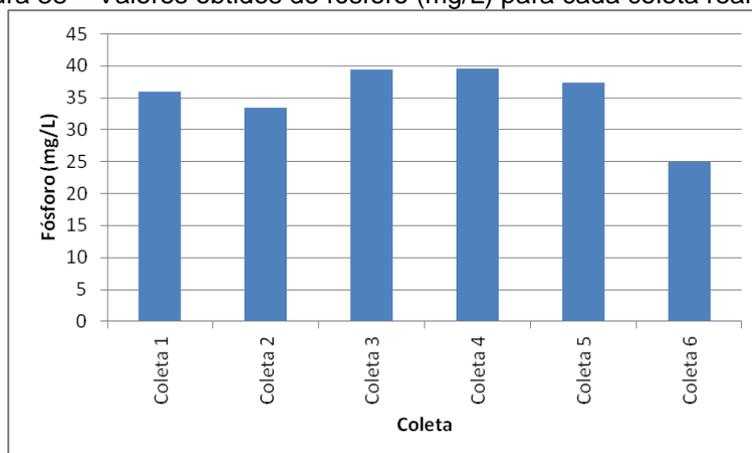
Portanto, o nitrogênio, e suas formas, é um parâmetro que pode ser explicado pela capacidade de absorção da planta, que, para esta pesquisa, com seu desenvolvimento, a absorção foi melhorando e seguiu diminuindo. Além disso, em relação aos estudos realizados por Farias (2012), Lima (2013), Silva (2017) e Gomes (2019), deve-se destacar que foram realizados com as vegetações já desenvolvidas, diferentemente deste estudo, em que as análises foram realizadas para, entre outros objetivos, identificar a contribuição da vegetação de Aranto para a qualidade da água escoada do telhado ecológico ao longo do seu desenvolvimento.

4.1.12 Fósforo

O fósforo é um nutriente necessário para o crescimento de sementes e frutos de uma planta, desse modo, plantas que não frutíferas, como o Aranto, acabam afetando o uso do fósforo presente no substrato e faz com que esse nutriente seja lixiviado em maior quantidade (CHEN *et al.*, 2018; GONG *et al.*, 2020). Além do fósforo total, esse nutriente é analisado em sua forma de fosfato, e é proveniente principalmente de fertilizantes e do próprio solo (BERNDTSSON, 2010; BEECHAM, RAZZAGHMANESH, 2015).

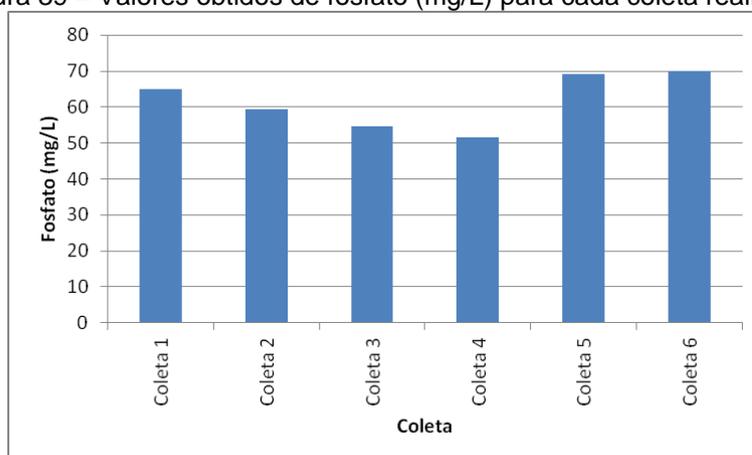
Nesta pesquisa, foram analisados os parâmetros fósforo total e fosfato, apresentados nas figuras 38 e 39, respectivamente. Os valores encontrados para fosfato foram maiores que os encontrados para o fósforo. Para o fósforo, obteve-se média igual a 35,10 mg/L \pm 5,47 mg/L, já para o fosfato, os valores obtidos foram em concentração bem maior, com média igual a 61,63 mg/L \pm 7,64 mg/L. Esses valores obtidos foram semelhantes aos de Lima (2013), que também obteve valores altos para o fosfato, tendo com valor máximo igual a 81,43 mg/L, para o telhado verde com Babosa.

Figura 38 – Valores obtidos de fósforo (mg/L) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

Figura 39 – Valores obtidos de fosfato (mg/L) para cada coleta realizada

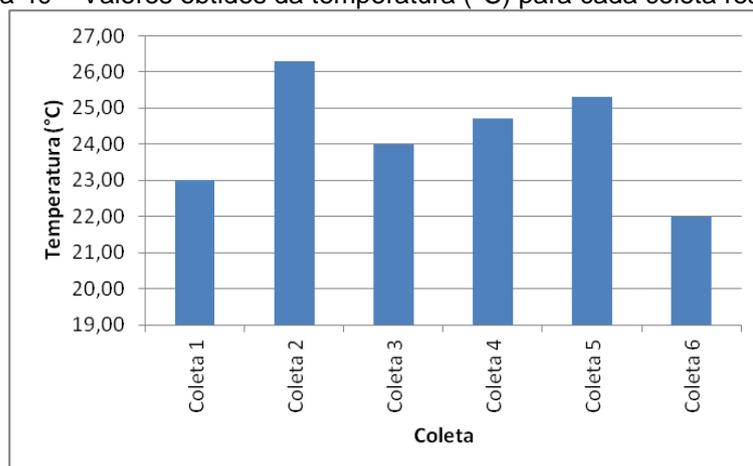


Fonte: Autora.

4.1.13 Temperatura

A temperatura é um parâmetro de extrema importância para a qualidade da água, já que com a variação da temperatura dessa água escoada do telhado ecológico outros parâmetros, como pH, condutividade elétrica e cloretos, são alterados. Nesta pesquisa, a temperatura média das coletas foi igual a $24,22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1,43 \text{ }^\circ\text{C}$, tendo a temperatura máxima sido observada coleta 2, igual a $26,30 \text{ }^\circ\text{C}$. A Figura 40 apresenta os valores de temperatura ao longo das análises.

Figura 40 – Valores obtidos da temperatura (°C) para cada coleta realizada



Fonte: Autora.

4.2 COMPARAÇÃO DAS ANÁLISES COM NORMAS E DISPOSITIVOS PERTINENTES

Os parâmetros analisados da qualidade da água escoada do telhado ecológico com Aranto foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 13.969, NBR 15.527 e Publicação da EMBRAPA. A NBR 13.969 dispõe sobre parâmetros para a disposição final dos efluentes líquidos de tanque séptico (ABNT, 1997). Já a NBR 15.527, trata do aproveitamento da água da chuva em coberturas de áreas urbanas para fins não potáveis (ABNT, 2019). E, por fim, a publicação da EMBRAPA estabelece os parâmetros de qualidade da água destinada à irrigação (ALMEIDA, 2010). A Tabela 7 apresenta os parâmetros analisados nesta pesquisa em comparação às normas e dispositivos pertinentes.

Tabela 7 – Resultados obtidos das coletas realizadas de 25/11/2021 a 26/05/2022 e limites estabelecidos pelos dispositivos pertinentes

Parâmetros	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Coleta 4	Coleta 5	Coleta 6	NBR 13.969			Lançamento nas galerias de águas pluviais	NBR 15.527	EMBRAPA
							Classe 1	Classe 2	Classe 3		Qualidade da água da chuva para usos não potáveis	Qualidade da água para irrigação
Cor Aparente (uC)	3441	2419	3077	2970	2007	1631	-	-	-	-	< 15	-
Turbidez (NTU)	51,70	20,80	14,70	18,60	16,50	32,20	< 5	< 5	< 10	-	< 5	-
Temperatura (°C)	23,00	26,30	24,00	24,70	25,30	22,00	-	-	-	< 40	-	-
pH	5,66	6,20	6,43	6,68	6,40	6,65	6 - 8	-	-	6 - 9	6 - 9	6 - 8,5
Condutividade Elétrica (dS/m)	2,200	2,330	1,183	0,472	0,281	0,164	-	-	-	-	-	0 - 3
SDT (mg/L)	3838	2108	910	720	668	627	< 200	< 200	-	-	-	0 - 2000
Cloretos (mg/L de Cl ⁻)	539,81	448,25	260,44	95,16	57,60	40,07	-	-	-	-	-	0 - 1063,5
Cálcio (mg/L de CaCO ₃)	426	210	130	49	30	10	-	-	-	-	-	0 - 400,8
Magnésio (mg/L de CaCO ₃)	460	245	75	43	45	30	-	-	-	-	-	0 - 60,8
Fosfato (mg/L)	64,91	59,43	54,69	51,58	69,13	70,02	-	-	-	-	-	0 - 2
Sulfato (mg/L)	464,78	300,33	262,11	155,44	91,89	82,56	-	-	-	-	-	0 - 960,6
Amônia (mg/L)	56,54	9,27	14,25	7,93	18,26	5,34	-	-	-	-	-	0 - 5
Nitrato (mg/L)							-	-	-	-	-	0 - 10

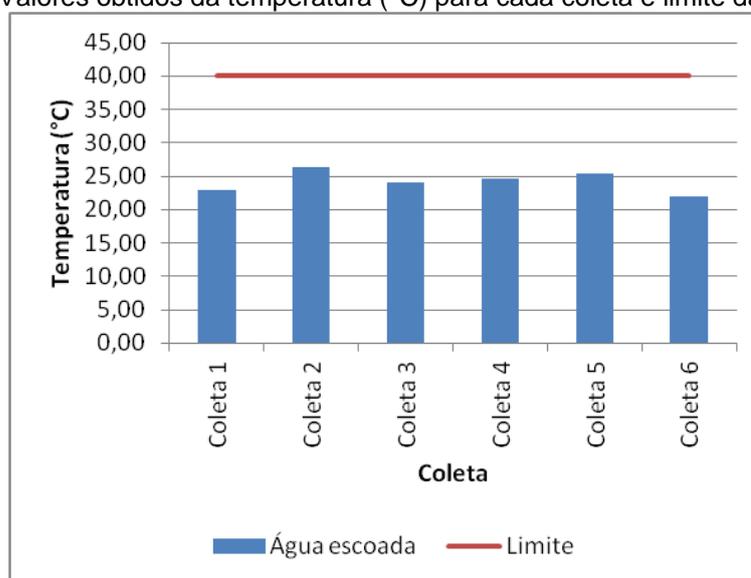
Legenda: classe 1 – lavagem de carro e reuso com contato direto do usuário com a água; classe 2 – lavagens de piso, calçadas e irrigação dos jardins; classe 3 – reuso nas descargas dos vasos sanitários.

Fonte: Autora.

4.2.1 Comparação com a NBR 13.969/97

Os parâmetros analisados da água escoada do telhado ecológico comparados com a NBR 13.969 foram turbidez, temperatura, pH e sólidos dissolvidos totais. Destes, apenas a temperatura analisada apresentou-se em todas as coletas abaixo do valor limite estabelecido de 40 °C para o lançamento da água escoada nas galerias de águas pluviais, conforme Figura 41. O experimento foi realizado em laboratório, dessa forma as temperaturas observadas são as mesmas do laboratório, que representam a estação do ano mais amena e com grande oferta de chuvas.

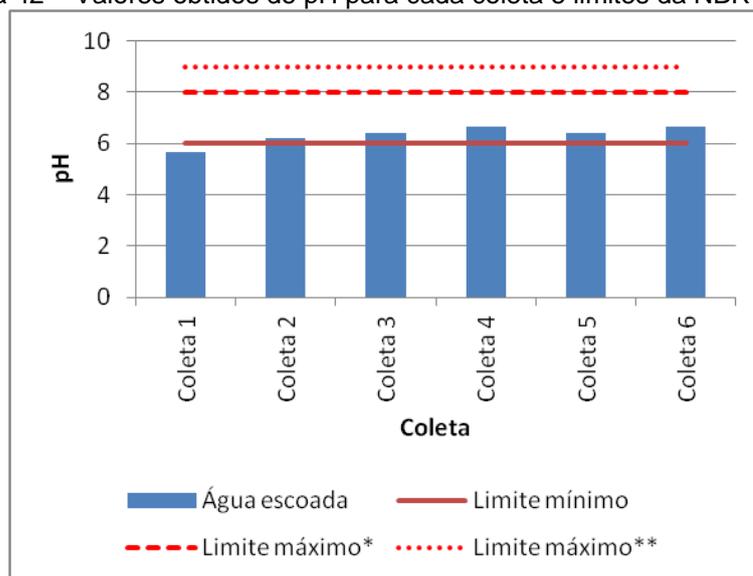
Figura 41 – Valores obtidos da temperatura (°C) para cada coleta e limite da NBR 13.969



Fonte: Autora.

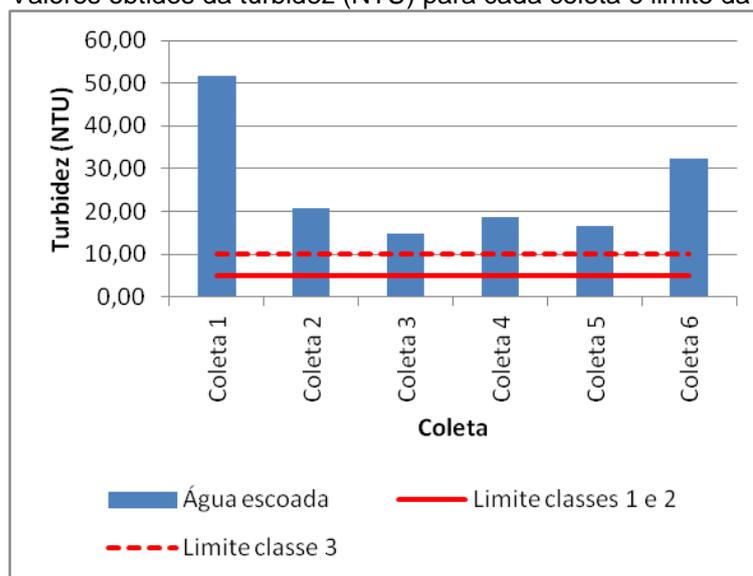
O pH se apresentou dentro da faixa de valores estabelecidas, exceto a primeira coleta, que não atingiu o limite mínimo estabelecido de pH igual a 6, como exposto na Figura 42. Observa-se na Figura 42 a presença de dois limites máximos para o pH, sendo o limite igual a 8 para a classe 1, lavagem de carro e reuso com contato direto do usuário com a água, e o limite igual a 9 para o lançamento em galerias de águas pluviais. Já os parâmetros turbidez (Figura 43) e sólidos dissolvidos totais (Figura 44), superaram os limites estabelecidos pela norma, já que esses parâmetros são diretamente influenciados pelo substrato que compõe o telhado ecológico, como mencionado anteriormente.

Figura 42 – Valores obtidos do pH para cada coleta e limites da NBR 13.969



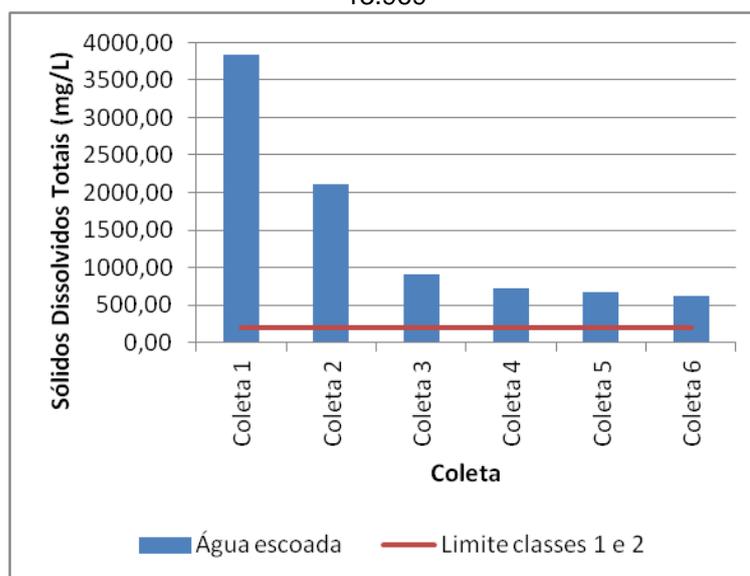
Fonte: Autora.

Figura 43 – Valores obtidos da turbidez (NTU) para cada coleta e limite da NBR 13.969



Fonte: Autora.

Figura 44 – Valores obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para cada coleta e limite da NBR 13.969



Fonte: Autora.

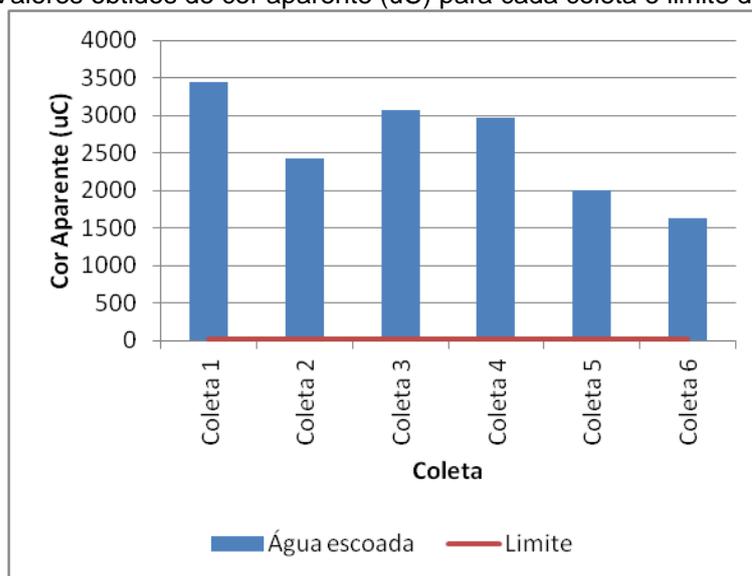
Apesar de não atender alguns dos limites propostos pela norma, a própria NBR 13.969 estabelece alternativas de tratamentos, como filtração e desinfecção, para que a água tenha o reuso adequado, a depender da classe pretendida para uso (ABNT, 1997).

Segundo a NBR 13.969, para usos com contato direto com a água, como lavagem de carro, recomenda-se tratamento aeróbio seguido de filtração e cloração. Já para lavagens de pisos, calçadas e irrigação de jardins, é sugerido o tratamento biológico, filtração e desinfecção. Para a utilização em descargas dos vasos sanitários e casos gerais é recomendado tratamento aeróbio seguido de filtração e desinfecção (ABNT, 1997). Além disso, é necessário avaliar parâmetros como coliforme fecal, cloro residual e oxigênio dissolvido, para a análise de reuso adequada.

4.2.2 Comparação com a NBR 15.527/19

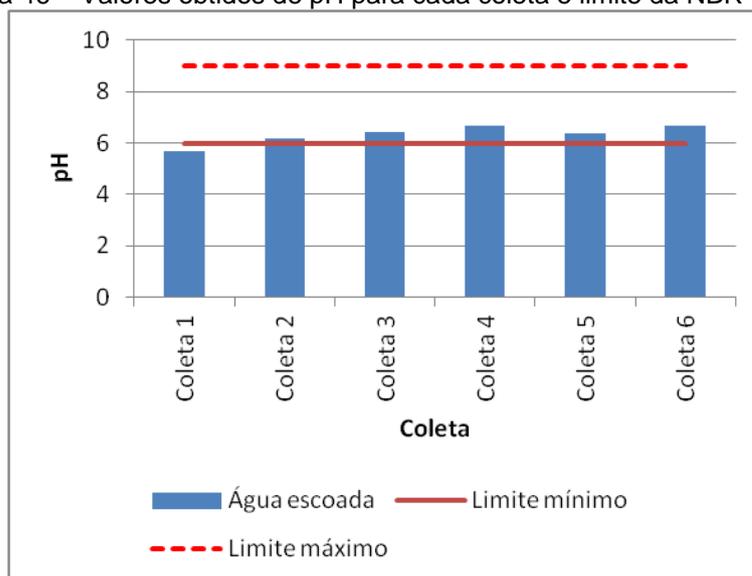
Em relação aos requisitos estabelecidos para o aproveitamento da água captada por coberturas para usos não potáveis da NBR 15.527, foram analisados a cor aparente, a turbidez e o pH. Assim como para a NBR 13.969, somente o pH se adequou aos limites estabelecidos, conforme exposto nas Figuras 45, 46 e 47.

Figura 45 – Valores obtidos de cor aparente (uC) para cada coleta e limite da NBR 15.527



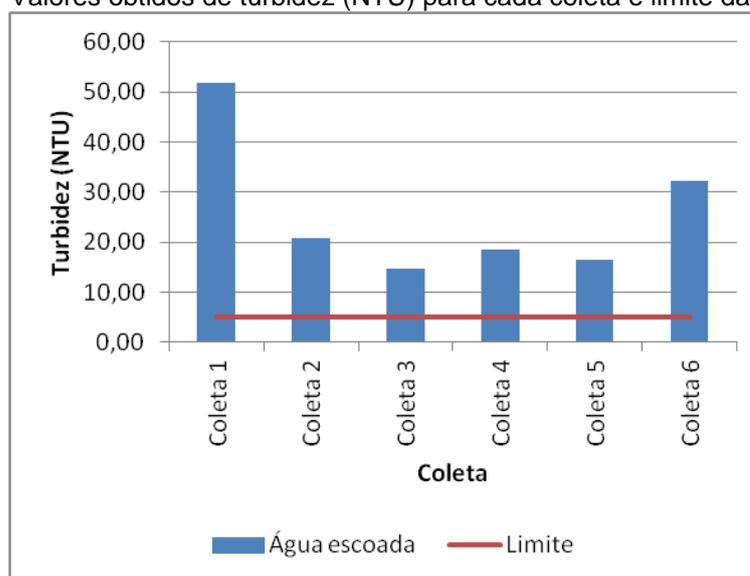
Fonte: Autora.

Figura 46 – Valores obtidos de pH para cada coleta e limite da NBR 15.527



Fonte: Autora.

Figura 47 – Valores obtidos de turbidez (NTU) para cada coleta e limite da NBR 15.527

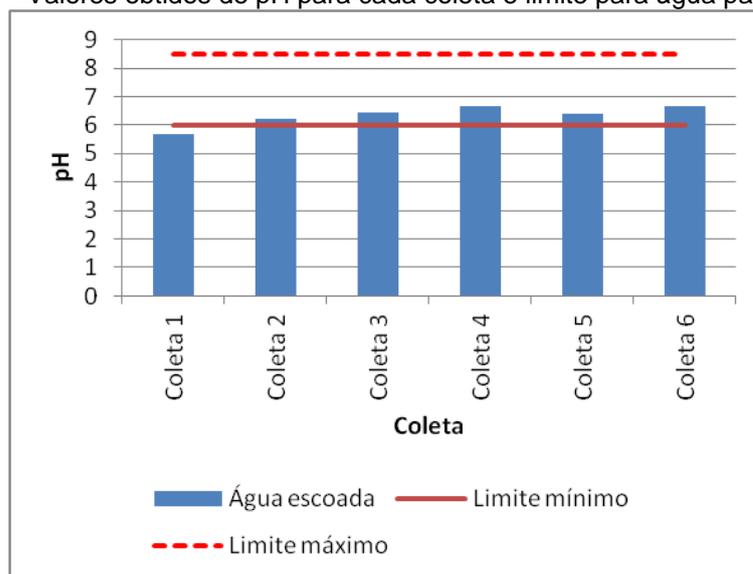


4.2.3 Comparação com a publicação sobre “Qualidade da água para irrigação” da EMBRAPA

A publicação “Qualidade da água para irrigação” da EMBRAPA trata de diversos aspectos relacionados à utilização de fontes de água para a irrigação, entre eles os parâmetros da água que devem ser analisados para que esse uso seja adequado (ALMEIDA, 2010). Dentre os parâmetros estabelecidos no documento da EMBRAPA, foram analisados pH, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, cloretos, cálcio, magnésio, fosfato, sulfato, amônia e nitrato.

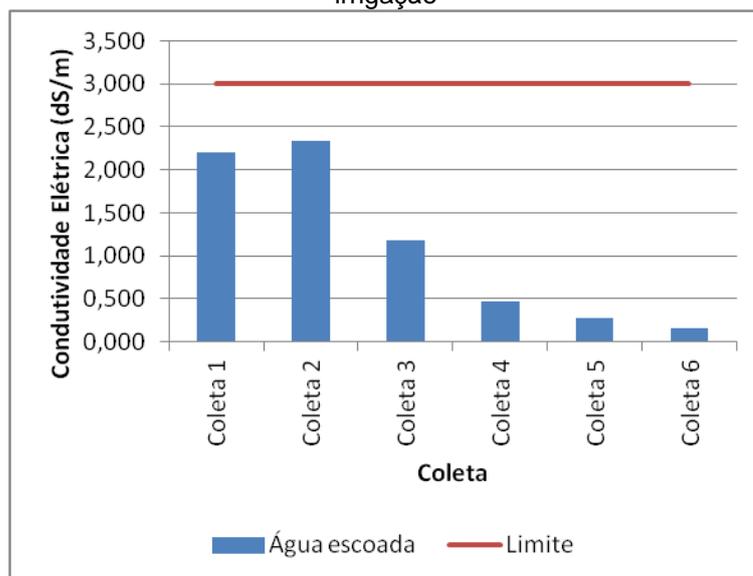
Os resultados obtidos nas análises realizadas da água escoada do telhado ecológico vegetado com Aranto em comparação aos limites estabelecidos pela publicação da EMBRAPA estão dispostos nas Figuras 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55 e 56. Os parâmetros que não atenderam ao limite foram o fosfato e a amônia, que fazem parte do grupo de nutrientes. De acordo com Almeida (2010), esses nutrientes quando apresentados em valores altos podem proporcionar crescimento vegetativo excessivo, desenvolvimento de frutos com qualidade inferior, dentre outros problemas.

Figura 48 – Valores obtidos de pH para cada coleta e limite para água para irrigação



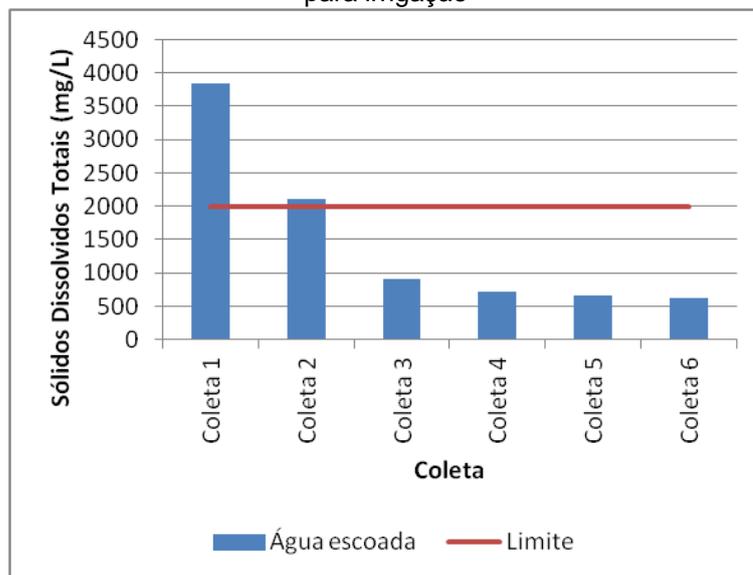
Fonte: Autora.

Figura 49 – Valores obtidos de condutividade elétrica (dS/m) para cada coleta e limite para água para irrigação



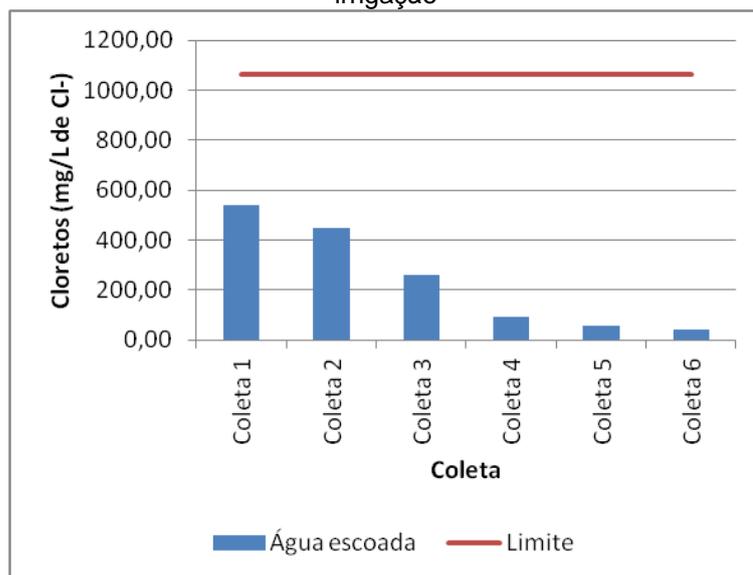
Fonte: Autora.

Figura 50 – Valores obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação



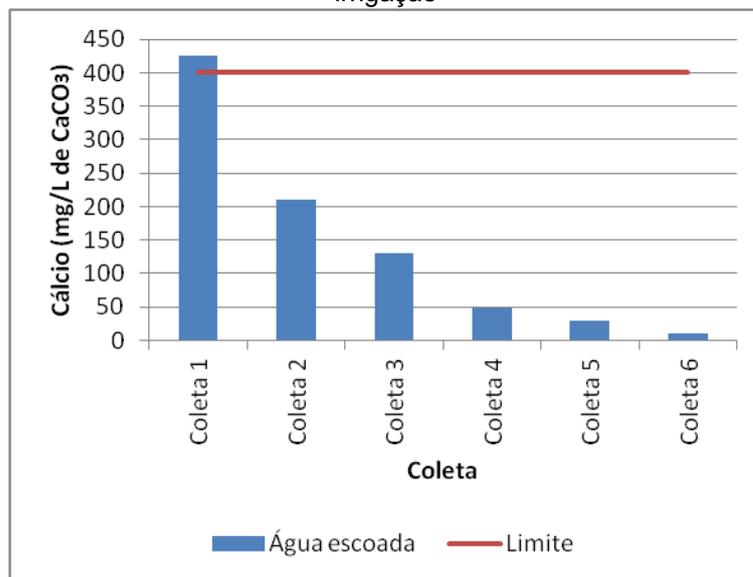
Fonte: Autora.

Figura 51 – Valores obtidos de cloretos (mg/L de Cl⁻) para cada coleta e limite para água para irrigação



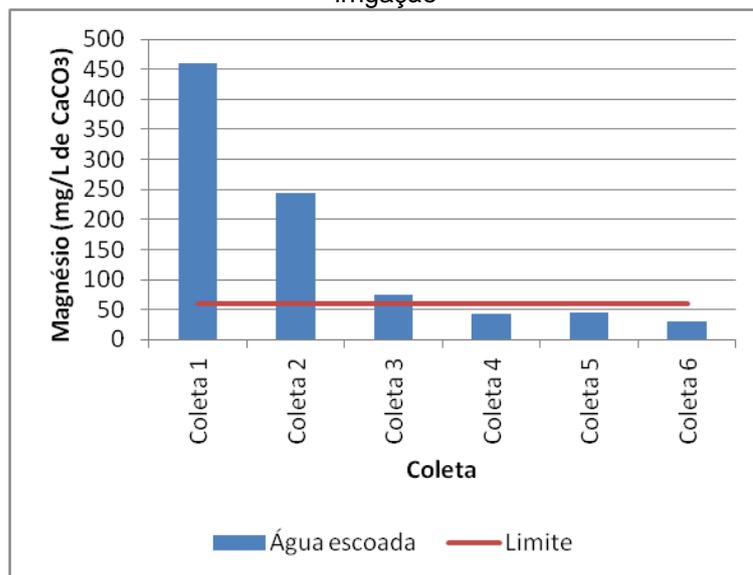
Fonte: Autora.

Figura 52 – Valores obtidos de cálcio (mg/L de CaCO_3) para cada coleta e limite para água para irrigação



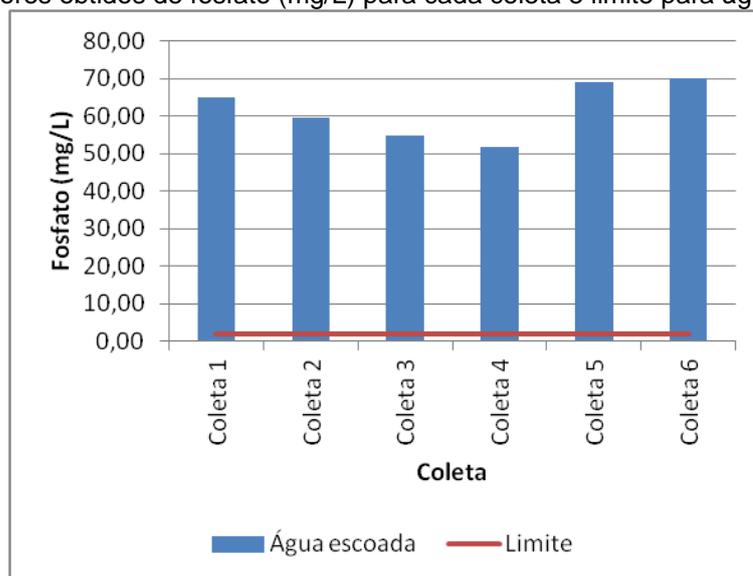
Fonte: Autora.

Figura 53 – Valores obtidos de magnésio (mg/L de CaCO_3) para cada coleta e limite para água para irrigação



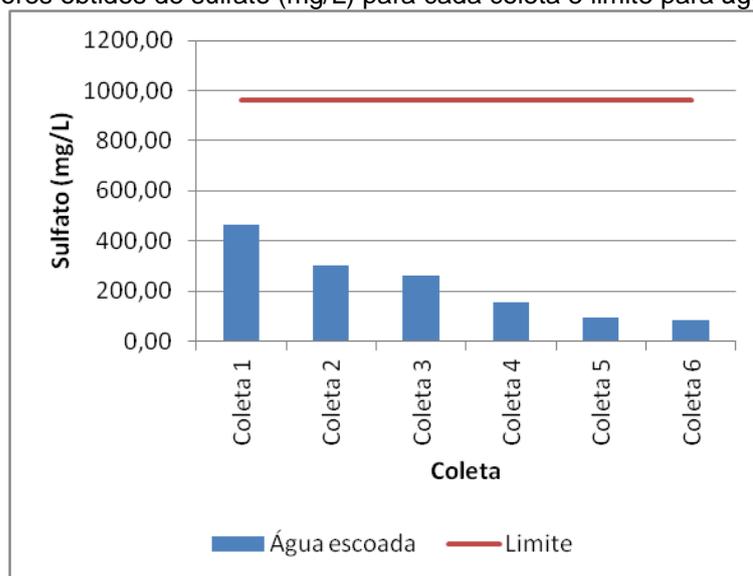
Fonte: Autora.

Figura 54 – Valores obtidos de fosfato (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação



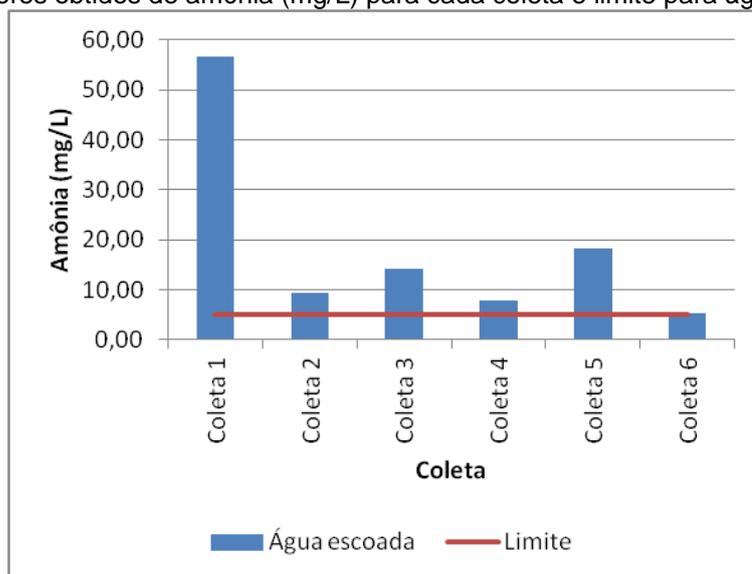
Fonte: Autora.

Figura 55 – Valores obtidos de sulfato (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação



Fonte: Autora.

Figura 56 – Valores obtidos de amônia (mg/L) para cada coleta e limite para água para irrigação



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Os telhados com vegetação trazem diversos benefícios com a sua implantação, como a retenção hídrica, a diminuição do escoamento durante eventos de chuva, conforto térmico e diminuição de ilhas de calor, diminuição de ruídos, entre outros. Além disso, a utilização de materiais de baixo custo na estrutura desses telhados, como garrafas PET, aliada aos benefícios já consolidados pela literatura, demonstram a importância dos telhados ecológicos vegetativos.

Neste estudo, a qualidade da água escoada do telhado ecológico de baixo custo com cobertura vegetal de Aranto foi analisada desde a colocação do substrato até o desenvolvimento da vegetação. O estudo foi realizado em ambiente controlado para analisar a contribuição do telhado ecológico e seus componentes para a qualidade da água, evitando a influência externa de outros fatores. A intensidade das precipitações simuladas foi definida a partir da curva IDF de chuvas intensas. Portanto, esta pesquisa representa a qualidade da água em condições de grandes chuvas e temperaturas amenas.

De acordo com os resultados obtidos, condutividade elétrica, dureza total, cálcio, magnésio, cloretos e sulfatos apresentaram comportamento de redução de valores ao longo das coletas, com destaque para as grandes variações ocorridas entre a coleta inicial, apenas com o substrato, e a segunda coleta, depois do plantio da vegetação. A coleta 1 apresentou valores maiores de concentração para a maioria dos parâmetros analisados, demonstrando que a primeira precipitação controlada foi a que gerou maior lixiviação. Acredita-se que esse fato está relacionado à função de atenuação e absorção desses parâmetros exercida pela vegetação. O pH também apresentou resultado positivo, tendendo à neutralidade, corroborando pesquisas realizadas ao longo dos anos acerca dessa capacidade dos telhados ecológicos com vegetação.

Em comparação aos dispositivos pertinentes, a partir das análises dos parâmetros de qualidade de água realizadas, foi possível verificar que a água escoada do telhado ecológico apresentou valores de cor, turbidez, sólidos dissolvidos totais, para a NBR 13.969 (classes 1, 2 e 3) e NBR 15.527, e fosfato e amônia, para a publicação da EMBRAPA, acima dos valores limites estabelecidos.

Em resumo, acredita-se que isso se relacione com a lixiviação do substrato e com a não absorção dos nutrientes nitrogênio e fósforo, e suas formas, pelas plantas. Já, de acordo com a NBR 13.969, para a classe 4 e lançamento nas galerias de águas pluviais, é necessário analisar os parâmetros que envolvem matéria orgânica, visto que os analisados nesta pesquisa, temperatura e pH, adequaram-se aos limites estabelecidos.

No caso de utilização das águas para a irrigação, é necessário realizar tratamento para a remoção dos nutrientes em alta concentração e análise dos demais parâmetros relacionados à qualidade da água necessária para esse fim. Para o reuso em lavagem de carro, lavagens de pisos, calçadas e em descargas dos vasos sanitários, além de tratamento para turbidez e sólidos dissolvidos totais, é necessário analisar o cloro residual e coliforme fecal. Dentre os tratamentos recomendados, tem-se o filtro aeróbio, com maior custo operacional, e o filtro de areia e de carvão ativado, com custo operacional menor.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se estudo de longo prazo da qualidade da água escoada de telhados ecológicos em clima semiárido para compreender melhor o comportamento considerando fatores como a idade do telhado, mudanças do substrato, o efeito da adição de camadas filtrantes e drenantes no arranjo do telhado. Além disso, recomenda-se a investigação de possíveis tratamentos para serem realizados nessa água escoada visando melhorar a sua qualidade.

Por fim, para a construção de telhados ecológicos de baixo custo com vegetação, devem-se levar em consideração também os diversos benefícios que esse tipo de telhado proporciona como retenção hídrica, conforto térmico, biodiversidade, lazer. Sendo assim, a investigação da qualidade da água escoada contribui ainda mais para a relevância dos telhados ecológicos.

REFERÊNCIAS

- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. **Water Air Soil Pollut**, v. 223, p. 4253-4273, 2012.
- AKTHER, M.; HE, J.; CHU, A.; VAN DUIN, B. Nutrient leaching behavior of green roofs: Laboratory and field investigations. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 141841, 2021.
- ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Dados eletrônicos, Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010, 228 p.
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- APHA – American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed., Washington DC, 2018.
- ARARAQUARA. **Lei nº 889, de 4 de junho de 2018**. Reformula o programa “IPTU Verde”, que concede isenção parcial de Imposto Predial e Territorial Urbano para propriedades que conservarem área arborizada e adotarem outras medidas de interesse ambiental. Araraquara: Câmara Municipal, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13969**: Tanques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos: projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15527**: Aproveitamento de água de chuvas de coberturas para fins não potáveis: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BABAYEMI, J. O.; NNOROM, I. C.; OSIBANJO, O.; WEBER, R. Ensuring sustainability in plastics use in Africa: consumption, waste generation, and projections. **Environmental Sciences Europe**, v. 31, n. 1, p. 1-20, 2019.
- BECK, D. A.; JOHNSON, G. R.; SPOLEK, G. A. Amending green roof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. **Environmental Pollution**, v. 159, p. 2111-2118, 2011.
- BEECHAM, S.; RAZZAGHMANESH, M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. **Water Research**, v. 70, p. 370-384, 2015.
- BERNDTSSON, J. C.; BENGTSSON, L.; JINNO, K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 3, p. 369-380, 2009.
- BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 4, p. 351-360, 2010.

BUDEL, Marcel Aramis. **Estudo comparativo da qualidade da água de chuva coletada em cobertura convencional e em telhado verde**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BUFFAM, I.; MITCHELL, M. E.; DURTSCHKE, R. D. Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 506-514, 2016.

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

CARPENTER, C. M. G.; TODOROV, D.; DRISCOLL, C. T.; MONTESDEOCA, M. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 664-672, 2016.

CARUARU. **Lei nº 62, de 27 de dezembro de 2018**. Institui o programa de incentivo denominado IPTU Verde no município de Caruaru e dá outras providências. Caruaru: Câmara Municipal, 2018.

CASTRO, B. M.; ANDRES, C. M.; KONRAD, J.; TASSI, R.; LIBERALESSO, T. Avaliação de escoamento pluvial em módulos de telhados verdes com diferentes substratos. **Acta Brasiliensis**, v. 3, n. 2, p. 69-73, 2019.

CASTLETON, H. F.; STOVIN, V.; BECK, S. B.; DAVISON, J. B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1582-1591, 2010.

CHEN, C.-F.; KANG, S.-F.; LIN, J.-H. Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 10-20, 2018.

CHEN, X.; SHUAI, C.; CHEN, Z.; ZHANG, Y. What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China? **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 742-750, 2019.

CONNELLY, M.; HODGSON, M. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. **Applied Acoustics**, v. 74, n. 10, p. 1136-1143, 2013.

CORADIN, L.; CAMILLO, J.; PAREYN, F. Germain Corneel (Ed.). **Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Nordeste**. Brasília, DF: MMA, 2018.

CORTÉS, C. F.; CASTILLO, C. A. D. Mejora de las condiciones de habitabilidad y del cambio climático a partir de ecotechos extensivos. Estudio de caso: barrio La

Isla, Altos de Cazucá, Soacha, Cundinamarca. **Cuadernos de vivienda y urbanismo**, v. 4, n. 8, 2011.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**. Diagnóstico do município de Caruaru, estado de Pernambuco. Recife: CPRM/PRODEEM, set. 2005.

CURITIBA. **Lei nº. 9.806, de 3 de janeiro de 2000**. Institui o Código Florestal do Município de Curitiba, e dá outras providências. Curitiba: Câmara Municipal, 2000.

FARIAS, Maria Mariah Monteiro Wanderley Estanislau Costa de. **Aproveitamento de águas de chuva por telhados: aspectos quantitativos e qualitativos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

FUNFGELT, K.; SOUZA, A. G.; TONET, E. A.; FACHINI, S. Telhado verde e a influência no conforto térmico em uma edificação de madeira no IFC campus Rio do Sul. In: **5ª Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnologia Interdisciplinar**. 2012, Camboriú. Anais[...]. Camboriú: Instituto Federal Catarinense, 6 p., 2012.

GHEYI, H. R.; PAZ, V. D. S.; MEDEIROS, S. D. S.; GALVÃO, C. D. O. Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações. **Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido**, 2012.

GOMES, Yan Ranny Machado. **Telhado verde em clima tropical úmido: investigação da qualidade da água**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GOMES, Y. R. M.; SANTOS, S. M.; MACEDO, P. M. T. Effects of ecological roofs in water quality: an experimental study over a humid tropical climate. **Sustainable Water Resources Management**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2023.

GONG, Y.; YIN, D.; LI, J.; ZHANG, X.; WANG, W.; FANG, X.; SHI, H.; WANG, Q. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments. **Science of the Total Environment**, v. 687, p. 505-515, 2019.

GONG, Y.; ZHANG, X.; LI, J.; FANG, X.; YIN, D.; XIE, P.; NIE, L. Factors affecting the ability of extensive green roofs to reduce nutrient pollutants in rainfall runoff. **Science of the Total Environment**, v. 732, p. 139248, 2020.

GREGOIRE, B. G.; CLAUSEN, J. C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. **Ecological Engineering**, v. 37, p. 963-969, 2011.

GUARULHOS. **Lei nº. 6.793, de 28 de dezembro de 2010**. Dispõe sobre o lançamento, arrecadação e fiscalização do Imposto Sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana - IPTU e dá outras providências. Guarulhos: Câmara Municipal, 2010.

HASHEMI, S. S. G.; MAHMUD, H. B.; ASHRAF, M. A. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 669-679, 2015.

HENRICH BÖLL FOUNDATION. **Atlas do Plástico**: Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Rio de Janeiro: Henrich Böll Foundation, 2020. ISBN 978-65-87665-02-3.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico de 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/censo/default.php>. Acesso em: 19 nov. 2020.

JIANG, L.; TANG, M. Thermal analysis of extensive green roofs combined with night ventilation for space cooling. **Energy and Buildings**, v. 156, p. 238-249, 2017.

JIM, C. Y. Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants. **Sustainable Cities and Society**, v. 35, p. 69-82, 2017.

JOBIM, Alan Lamberti. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

KRESIC, N. **Hydrogeology and groundwater modeling**. 2. Ed. Boca Raton: CRC press, 2006.

KOTZE, D. J.; KUOPPAMÄKI, K.; NIEMIKAPEE, J.; MESIMÄKI, M.; VAUROLA, V.; LEHVÄVIRTA, S. A revised terminology for vegetated rooftops based on function and vegetation. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 49, p. 126644, 2020.

LI, C.; LIU, M.; HU, Y.; SHI, T.; QU, X.; WALTER, M. T. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 301-311, 2018.

LIMA, Glenda Cordeiro de Oliveira. **Avaliação do Desempenho de Telhados Verdes**: Capacidade de Retenção Hídrica e Qualidade da Água Escoada. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013.

LIU, W.; WEI, W.; CHEN, W.; DEO, R. C.; SI, J.; XI, H.; LI, B.; FENG, Q. The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs. **Journal of Hydrology**, v. 576, p. 575-582, 2019.

MANSO, M.; TEOTÓNIO, I.; SILVA, C. M.; CRUZ, C. O. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110111, 2021.

MARTIN, E. J.; OLIVEIRA, D. S.; OLIVEIRA, L. S.; BEZERRA, B. S. Life cycle comparative assessment of PET bottle waste management options: a case study for the city of Bauru, Brazil. **Waste Management**, v. 119, p. 226-234, 2021.

MARTINS, L. S.; PINTO, J. S. Avaliação quali-quantitativa de telhado verde extensivo em escala piloto. **Disciplinarum Scientia. Série: Naturais e Tecnológicas**, v. 17, n. 2, p. 245-257, 2016.

MEDEIROS, S. S.; CAVALCANTE, A. M. B.; MARIN, A. M. P.; TINÔCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H.; PINTO, T. H. **Sinopse do Censo Demográfico para o Semiárido Brasileiro**. INSA. Campina Grande - PB, 2012.

NAGASE, A. Novel application and reused materials for extensive green roof substrates and drainage layers in Japan—Plant growth and moisture uptake implementation. **Ecological Engineering**, v. 153, p. 105898, 2020.

NARANJO, A.; COLONIA, A.; MESA, J.; MAURY-RAMÍREZ, A. Evaluation of semi-intensive green roofs with drainage layers made out of recycled and reused materials. **Coatings**, v. 10, n. 6, p. 525, 2020.

NOGUEIRA, Joyce Daiane de Lima. **Qualidade da água de telhados verdes na cidade de Natal/RN: análise do pH, condutividade elétrica e turbidez**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

PANZIERA, A. G; CALIL, V. S.; AMARAL, F. D.; SWAROWSKY, A. Desempenho de diferentes tipos de telhado verde no conforto térmico urbano na cidade de Santa Maria, RS. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 16, n. 3, p. 445-457, 2015.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

PEREIRA JÚNIOR, A. A. M.; SILVA, S. A. O. **Montagem de telhado verde com a utilização de materiais de baixo custo**. Projeto No. 604. Monografia apresentada ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte: CEFET, 2011.

PERERA, S.; ARULRAJAH, A.; WONG, Y. C.; HORPIBULSUK, S.; MAGHOOL, F. Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 200-209, 2019.

PERNAMBUCO. **Lei nº 14.028, de 26 de março de 2010**. Cria a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, e dá outras providências. Recife: Assembleia Legislativa de Pernambuco, 2010.

PESSOA, Jonas Onis. **Qualidade e quantidade de águas pluviais escoadas a partir de telhados verdes extensivos em Santa Maria – RS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

RECIFE. **Lei nº. 18.112, de 12 de janeiro de 2015**. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do

"telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. Recife: Câmara Municipal, 2015.

ROCHA, Ranny Scarllet. **Desempenho térmico de telhado verde ecológico de baixo custo em clima semiárido**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

ROWE, D. B. Green roofs as a means of pollution abatement. **Environmental Pollution**, v. 159, p. 2100-2110, 2011.

SANTOS, Gilles Chaves dos. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste de Pernambuco**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

SANTOS, S. M.; MARINHO, E. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, C. M. M.; ARAUJO, T. F.; BARROS, E. S. Estudo da qualidade da água de um telhado verde no agreste pernambucano. In: XIVth IWRA WORLD WATER CONGRESS, 2011, Porto de Galinhas. **XIVth IWRA World Water Congress**, p. 1-13, 2011.

SANTOS, S. M.; MARINHO, É. P.; LIMA, G. C. D. O.; BARROS, E. S.; GOMES, Y. R. M. Green roof drained rainwater quality assessment: a physicochemical analysis from a case study in Northeastern Brazil. **Sustainable Water Resources Management**, v. 8, n. 4, p. 1-12, 2022.

SANTOS, S. M.; SILVA, J. F. F.; SANTOS, G. C.; MACEDO, P. M. T.; GAVAZZA, S.. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. **Journal of Cleaner Production**, 219: 639-648, 2019.

SARACOGLU, O. A.; CAKAR, H.; AKAT, H.; ADANACIOGLU, H. Performance analysis of different geotextile materials in extensive roof garden designs. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 30, n. 4, p. 484–492-484–492, 2022.

SAVI, Adriane Cordoni. **Telhados verdes: uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 757-773, 2018.

SILVA, Marcelo Carlos de Oliveira. **Abordagem multicritério para análise de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário com auxílio de dados espaciais de alta resolução**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

SILVA, T. F.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M. Capacidade de retenção de água em um telhado verde: Estudo de caso em Caruaru. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

RECURSOS HÍDRICOS, 2015, Brasília – DF. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2015.

SILVA, Thomas Fernandes da. **Tecnologia alternativa em drenagem urbana: telhado verde**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

SOTO, F. R. C.; BUENO, J. J. P.; LÓPEZ, M. L. M.; RAMOS, M. E. P.; ARAIZA, J. L. R.; JIMÉNEZM R. R.; MANZANO-RAMÍREZ, A. Evaluating the Thermal Behavior of a Sustainable Room and Roof Prototype Using Recycled Waste Materials. **Recycling**, v. 5, n. 1, p. 2, 2020.

TALEBI, A.; BAGG, S.; SLEEP, B. E.; O'CARROLL, D. M. Water retention performance of green roof technology: A comparison of canadian climates. **Ecological Engineering**, v. 126, p. 1-15, 2019.

TAN, C. L.; TAN, P. Y.; WONG, N. H.; TAKASUNA, H.; KUDO, T.; TAKEMASA, Y.; LIM, C. V. J.; CHUA, H. X. V. Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 830-842, 2017.

TEEMUSK, A.; MANDER, Ü. The influence of green roofs on runoff water quality: a case study from Estonia. **Water Resources Management**, v. 25, n. 14, p. 3699-3713, 2011.

TEIXEIRA, C. A.; BUDEL, M. A.; CARVALHO, K. Q. de; BEZERRA, S. M. da C.; GHISI, E. Estudo comparativo da qualidade da água da chuva coletada em telhado com telhas de concreto e em telhado verde para usos não potáveis. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 135-155, 2017.

TODOROV, D.; DRISCOLL, C. T.; TODOROVA, S.; MONTESDEOCA, M. Water quality function of an extensive vegetated roof. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 928-939, 2018.

UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects 2018: Highlights**. ST/ESA/SER.A/421. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). Disponível em <<http://www.unpopulation.org>>, acesso em: 17 nov. 2019.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2019: Highlights** (ST/ESA/SER.A/423). Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). Disponível em <<http://www.unpopulation.org>>, acesso em: 17 nov. 2019.

VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M.; BALASUBRAMANIAN, R. Effect A field study to evaluate runoff quality from green roofs. **Water Research**, v. 46, p. 1337-1345, 2012.

VIJAYARAGHAVAN, K.; RAJA, F. D. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. **Water Research**, v. 63, p. 94-101, 2014.

VILA VELHA. **Lei nº. 4.864, de 29 de dezembro de 2009**. Altera as tabelas I e VII, da lei nº 4.017, de 26 de dezembro de 2002, e tabelas II e V da lei nº 3.871, de 20 de dezembro de 2001, que editou a PGV - planta genérica de valores imobiliários, cria a tabela XIV - fator gleba e fator de localização e utilização da edificação para os condomínios verticais e dá outras providências. Vila Velha: Câmara Municipal, 2009.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WANG, X.; TIAN, Y.; ZHAO, X. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. **Science of the Total Environment**, v. 592, p. 465-476, 2017.

WILLES, José Alex. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

WONG, N. H.; TAN, A. Y. K.; TAN, P. Y.; CHIANG, K.; WONG, N. C. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. **Building and Environment**, v. 45, p. 411-420, 2010.

YANG, H. S.; KANG, J.; CHOI, M. S. Acoustic effects of greens systems on a low-profiled structure at street level. **Building and Environment**, v. 50, p. 44-55, 2012.

ZHANG, R.; MA, X.; SHEN, X.; ZHAI, Y.; ZHANG, T.; JI, C.; HONG, J. PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles. **Journal of Environmental Management**, v. 260, p. 110062, 2020.