

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA UNIDADE EM ESCALA REAL PARA TRATAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL EMPREGANDO A FILTRAÇÃO DIRETA POR MEIO DE FILTRO DE PRESSÃO E AMIDO NATURAL DE MILHO COMO COAGULANTE PRIMÁRIO

PERFORMANCE ANALYSES OF A FULL-SCALE RAINWATER TREATMENT UNIT USING DIRECT FILTRATION AND STARCH AS PRIMARY COAGULANT

Marcela Ferreira Murakami¹, Rodrigo Braga Moruzzi²

¹Engenheira Ambiental, Mestre em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos, SP.
E-mail: marcelamurakami@hotmail.com

²Professor Assistente Doutor da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus de Rio Claro.
Avenida 24A, 1515, Rio Claro, SP. CEP: 13506-900. Telefone: (19) 3526 9339.
E-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br

RESUMO

Este trabalho investigou o desempenho de um sistema experimental de tratamento de água pluvial, visando uso não potável. Optou-se por prescindir o descarte da primeira chuva (*first flush*) na expectativa de controlar a qualidade da água captada somente via sistema de tratamento e minimizar o volume descartado pelo *first flush*. Foram realizados ensaios de filtração direta em escala real com emprego de filtro de pressão e aplicação de solução de amido natural de milho como coagulante primário. Para avaliação do desempenho do sistema, foram analisadas a eficiência na remoção de impurezas ao longo das carreiras de filtração e a produção efetiva do sistema. Os resultados indicaram remoção de turbidez de até 70,8% e remoção de cor aparente de até 61,0%. A retrolavagem do sistema de filtração foi completada em 3 minutos a uma taxa de 1.440 m³/m²dia com consumo percentual de água tratada da ordem de 0,5 a 2,2% do volume potencialmente captável.

Palavras-chave: água pluvial, captação, tratamento, aproveitamento, economia.

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the performance of an experimental rainwater treatment system for non-potable uses. Without the first-flush discharge it was expected to control the quality of captured rainwater and to minimize the rainwater by-pass caused by the first-flush strategy. A full-scale direct filtration unit was operated and a solution of natural corn starch was used as the primary coagulant. The color, turbidity and coliform efficiencies of the unit was analyzed based on filtration loads and the net water production was estimated. The results pointed out turbidity removal up to 70.8% and color removal up to 61.0%. The backwash of the filtering system was completed in 3 minutes at the rate of 1,440 m³/m²day with consumption of treated water from 0.5% to 2.2%, based on the potentially harvesting.

Keywords: Rainwater, catchment, treatment, utilization, economy.

1 – INTRODUÇÃO

Na busca de fontes alternativas de abastecimento, o aproveitamento de águas pluviais surge com prática potencialmente capaz de suprir parte da demanda hídrica de usos menos nobres e, assim, disponibilizar água de melhor qualidade para usos que assim a necessitam.

Os sistemas de aproveitamento de águas pluviais baseiam-se na coleta das precipitações escoadas sobre áreas impermeáveis e no armazenamento dessas águas em reservatórios de acumulação, para uso imediato ou ao longo do tempo. Dependendo da tipologia, da relação entre a oferta e a demanda e do princípio norteador de cálculos dos reservatórios, a acumulação pode perdurar por todo o período de estiagem.

Embora na grande maioria dos casos o aproveitamento de águas pluviais não objetive fins potáveis, a qualidade das águas armazenadas não deve ser desconsiderada, pois a mesma pode acarretar danos aos constituintes do sistema de aproveitamento, como corrosão ou formação de

incrustações, além do possível risco à saúde dos usuários do sistema (MAY, 2009). Lye (2009) apresenta uma revisão sobre qualidade de água pluvial escoada em telhado. O autor conclui que vários tipos de tratamentos podem ser requeridos à água pluvial, a depender do uso pretendido. O trabalho apresenta ainda alguns resultados que permitiram o autor inferir que a água pluvial é um dos principais responsáveis pela contaminação dos ecossistemas por metais pesados (principalmente Zn⁺²) e apresenta dados com diferentes concentrações de uma diversidade de espécies de micro-organismos.

De acordo com o manual de qualidade de água e tratamento da *American Water Works Association* (AWWA, 1990), a escolha do esquema de tratamento de água depende, dentre outros fatores, da qualidade da água bruta e da qualidade a que se deseja chegar. São encontrados na literatura poucos exemplos de sistemas de tratamento de água pluvial para fins não potáveis. Existem alguns trabalhos com emprego de técnicas sofisticadas, tais como membrana e ozonização (KIM; LEE; KIM, 2005);

ou mesmo emprego sem nenhuma espécie de tratamento (KAHINDA; TAIGBENU; BOROTO, 2007), entre outros. Todavia, tal como apontado em Li *et al.* (2010) o tratamento simples apresenta-se como o mais promissor. Os autores citam a filtração lenta e a desinfecção como técnicas simples de tratamento.

No Brasil, o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico PROSAB em seu edital 04, coordenado por Gonçalves (2006), apresenta que a utilização da água da chuva requer um controle de sua qualidade e a verificação da necessidade de tratamento, a fim de propiciar segurança à saúde do usuário e o não comprometimento da vida útil dos componentes do sistema de aproveitamento.

O descarte inicial da primeira chuva (*first flush*) é uma prática comumente empregada em sistemas de abastecimento de águas pluviais e consiste na abstração dos milímetros iniciais antes da acumulação. Porém, dependendo da área de captação e dos milímetros que são estipulados para o descarte (a NBR 15527:2007 (ABNT, 2007) estabelece entre 0,4 e 8,5 mm), grandes volumes de água deixam de ser captados e, conseqüentemente, aproveitados.

Xavier (2010) avaliou a influência de barreiras sanitárias por meio da análise de águas pluviais coletadas após a instalação de dispositivos de desvio (DFH). Os resultados apontaram concentrações de Coliformes totais (NMP/100 mL), *E. coli* (NMP/100 mL), e Bactérias heterotróficas totais (UFC/mL) de, respectivamente, 1×10^3 ; $1,7 \times 10^1$ e $1,5 \times 10^3$ antes do DFH; e $1,5 \times 10^3$; $2,3 \times 10^2$ e $1,7 \times 10^3$ depois do DFH. Murakami e Moruzzi (2008) encontraram concentrações de coliformes termotolerantes de $1,3 \times 10^6$ NMP/100 mL e bactérias heterotróficas de $9,9 \times 10^3$ UFC/mL. Tais resultados ilustram que os dispositivos de descarte não atuam com eficiência na remoção de micro-organismos.

Ademais, a variação temporal das chuvas, suas intensidades, a composição atmosférica, regime de ventos etc. incorrem em grande variação da qualidade da chuva captada, tornando imprecisa a definição de valores adequados de descarte e podendo comprometer os usos pretendidos. Um estudo que comprova tais efeitos é apresentado em Nakada e Moruzzi (2014).

Assim, este estudo investigou o desempenho de um sistema de tratamento, cuja coleta de água pluvial prescindiu o descarte da primeira chuva, na expectativa de controlar a qualidade da água pluvial produzida, garantindo seu aproveitamento e eliminando o descarte decorrente da abstração da primeira chuva.

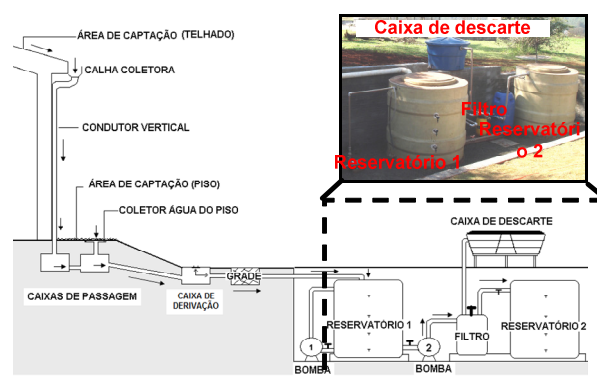
2 – METODOLOGIA

Para a consecução dos ensaios utilizou-se uma estação experimental de captação e tratamento de águas pluviais, construída em escala real. Vale mencionar que a simplificação dos procedimentos operacionais de tratamento foi o eixo norteador na definição da estratégia de operação do sistema, possibilitando a adoção desses procedimentos sem a necessidade de formação específica dos operadores. Assim, o sistema era constituído por filtração direta com emprego de filtro de pressão e

aplicação de solução de amido natural de milho como coagulante primário. Para avaliação do desempenho do sistema, foi analisada a eficiência na remoção de impurezas ao longo das carreiras de filtração, além de estimada a produtividade efetiva do sistema.

Para montagem e instalação da estação experimental de tratamento de águas pluviais, utilizou-se uma área de aproximadamente 30 m². Na Figura 1 é apresentado um esquema da vista lateral da estação experimental utilizada. Nas seções seguintes são descritos o funcionamento e os procedimentos para a consecução dos ensaios na unidade experimental.

Figura 1 – Corte esquemático da estação experimental de captação e tratamento de águas pluviais utilizadas e fotografia em detalhe da instalação. Sem escala.



2.1 Descrição da etapa de captação

A água pluvial interceptada pelo telhado escoava até as calhas coletoras e era conduzida, por meio dos condutores horizontais e verticais, até as caixas de passagem instaladas sob o piso externo do prédio. Nessas caixas, ocorria a junção da água pluvial escoada pelo telhado e da água pluvial escoada sobre parcela do piso externo. As áreas do telhado em planta e do piso lateral ao prédio correspondiam a valores de 350 m² e 20 m², respectivamente, totalizando uma área de captação de 370 m².

Das caixas de passagem, a água pluvial seguia para a caixa de derivação. Esta era constituída de uma entrada e duas saídas, as quais possuíam sistemas de fechamento independentes. Assim, quando se desejava fazer uso do sistema de tratamento, a água coletada seguia até a caixa de passagem contendo grade e, dessa, até a estação de captação e tratamento de águas pluviais, sendo acumulada no Reservatório 1, com capacidade para 3 m³. Do Reservatório 1 a água segue para o sistema bomba/filtro de pressão e, posteriormente, a água filtrada segue para o Reservatório 2.

Visando garantir um tempo médio de filtração de 60 minutos, empregou-se uma taxa efetiva média de filtração de 1.200 m³/m².dia, para a área em planta do filtro de 0,06 m², o que resulta em vazão de 50 L/min, sendo assim capaz de esgotar o reservatório de 3.000 L.

2.2 Descrição da etapa de tratamento

A grande variabilidade das águas pluviais coletadas é influenciada, sobretudo, pela deposição de sólidos durante o período de estiagem e pela decomposição de matéria orgânica. Dessa forma, antes de se realizar o tratamento das águas de chuva coletadas (após escoamento superficial direto), procederam-se ensaios em escala de laboratório para cada precipitação captada, em uma unidade para ensaios de coagulação-floculação, por meio de Jarreste. O objetivo foi a obtenção de boa condição de coagulação, a fim de aplicar no sistema de escoamento contínuo.

As dosagens de amido natural investigadas variaram de 1 a 12 mg.l⁻¹ em pH de coagulação entre 4,7 e 7,3. O gradiente médio de velocidade foi determinado com base nas configurações da instalação experimental, calculado conforme Equação 1, apresentado em Di Bernardo e Dantas (2005).

$$G = \left(\frac{\gamma}{2 \cdot \mu \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{f}{4 \cdot Rh} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot Vm^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Em que: G = gradiente médio de velocidade (s⁻¹); γ = peso específico da água (N/m³); μ = viscosidade absoluta da água (N/m.s²); f = fator de atrito da fórmula Universal (Darcy-Weisbach) de perda de carga(-); Rh = raio hidráulico (m); g = aceleração da gravidade (m/s²); Vm = velocidade média de escoamento (m/s).

O tempo de coagulação foi estimado com base na razão entre volume da tubulação (área da seção transversal multiplicada pelo comprimento até a entrada do filtro) e vazão média afluyente ao filtro. Com isso, o valor do gradiente médio de velocidade foi mantido fixo em 45 s⁻¹ durante todo tempo de floculação. Em seguida as amostras coletadas em laboratório eram submetidas à filtração em papel de filtro do tipo Whatman40 (porosidade média de 8x10⁻³ mm). Após a filtração em laboratório, os parâmetros cor aparente e turbidez de cada uma das amostras eram medidos. Tal procedimento foi repetido para cada precipitação escoada investigada, devido à variação de qualidade da água pluvial afluyente ao sistema de tratamento. Determinada a dosagem de solução de amido natural de milho a ser utilizada, iniciava-se a etapa de filtração em escala plena. Primeiramente homogeneizava-se a água pluvial armazenada no Reservatório 1 por cerca de 10 min. As amostras para análise eram coletadas por meio de quatro pontos de amostragem instalados ao longo da altura do reservatório buscando-se, com isso, obter uma amostra composta representativa da água pluvial armazenada. Adicionava-se à água pluvial contida no Reservatório 1 a solução de amido natural de milho, correspondente a dosagem determinada na etapa laboratorial.

As soluções de amido de milho foram preparadas a partir de uma adaptação da metodologia de gelatinização apresentada por Campos e Di Bernardo (1988). A mistura água pluvial mais solução de amido natural de milho era homogeneizada por 30 minutos. Ressalta-se que a finalidade não era realizar a floculação propriamente dita, tampouco reproduzir as condições encontradas na

instalação em escoamento contínuo, mas sim proporcionar a desestabilização do material particulado antes da passagem pelo filtro de pressão. Assim, os ensaios de batelada visaram somente à obtenção de boas condições de coagulação, e não a condição ótima.

A estratégia de coleta, armazenamento e tratamento empregado constituía, em virtude das características próprias do sistema, em uma unidade de tratamento em regime de batelada. Ademais, buscou-se investigar uma estratégia de tratamento simples, nos moldes dos sistemas de tratamento de água de piscina, onde os produtos químicos são dosados diretamente nos tanques de armazenamento.

O meio filtrante utilizado no presente estudo foi comprado juntamente com o filtro de pressão. O fabricante não fornece a curva granulométrica do material filtrante, sendo necessário caracterizá-la. Assim, uma amostra do meio filtrante foi submetida à análise granulométrica.

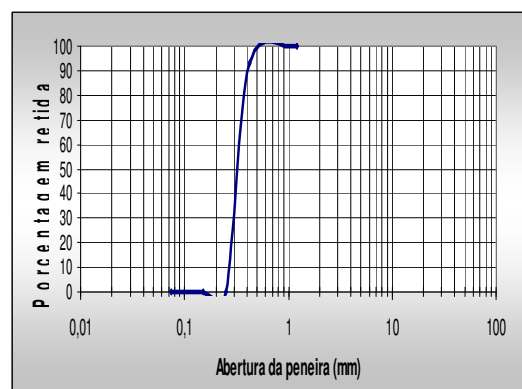
Os resultados obtidos no ensaio encontram-se expostos na Tabela 1, que apresenta o número e a abertura das peneiras utilizadas e a porcentagem do material retido. Na Figura 2 é mostrada a curva granulométrica do meio filtrante.

Por meio de um registro instalado na tubulação entre o Filtro e o Reservatório 2, oito amostras de 100 mL da água pluvial já filtradas eram coletadas nos tempos: 0; 5; 10; 15; 20; 30; 45 e 60 minutos e reservadas para futura análise.

Tabela 1 – Resultado do ensaio granulométrico do meio filtrante.

	Peneira (mm)	Material retido (%)
	1,200	6,91
	0,420	92,97
	0,250	0,08
	0,150	0,03
	0,075	0,01
	Total	100,00

Figura 2 – Curva granulométrica do meio filtrante utilizado no presente estudo



Essa etapa do estudo tinha por objetivo investigar o efluente ao filtro durante a carreira de filtração e verificar a possível ocorrência de transpasse.

Durante todo o processo de filtração coletava-se, também, em um recipiente previamente limpo e desinfetado, uma amostra de cerca de 20 litros de água filtrada, que era reservada e posteriormente analisada.

Entre cada carreira de filtração realizava-se a limpeza do filtro de pressão, com o objetivo de mantê-lo com as mesmas condições iniciais a cada utilização.

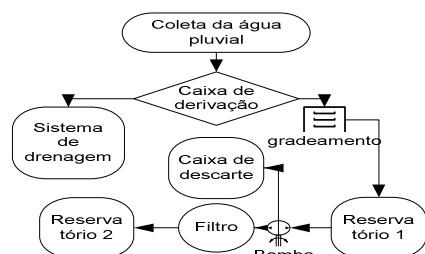
O procedimento de limpeza ocorria da seguinte maneira: primeiramente configurava-se o Filtro na posição “lavar” e, em seguida, ligava-se a Bomba 2. Com isso, a água contida no Reservatório 2 (água pluvial filtrada) era bombeada em contra-fluxo, limpando o filtro e sendo direcionada até a Caixa de Descarte.

Visando-se estimar a produção efetiva do sistema, coletavam-se de minuto em minuto, a começar no tempo zero e encerrar-se no décimo minuto, amostras da água de lavagem que chegava à Caixa de Descarte. Com a verificação da cor aparente e turbidez dessas amostras, determinava-se o tempo de lavagem necessário para estimativa do volume de água pluvial utilizado para limpeza do meio filtrante. A lavagem foi realizada empregando taxa de 1440 m³/m²dia no sentido ascensional.

2.3 Caracterizações físico-químicas e microbiológicas

Todas as análises laboratoriais efetuadas durante o presente estudo foram realizadas nos Laboratórios de Química e Microbiologia do Centro de Análise e Planejamento (CEAPLA) da UNESP de Rio Claro, seguindo metodologia estabelecida pelo *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 21th* (APHA, 1995). Na Figura 3 é apresentado um fluxograma esquemático simplificado do sistema de tratamento de água pluvial investigado.

Figura 3 – Fluxograma esquemático simplificado do sistema de tratamento de água pluvial investigado.



As análises realizadas nas amostras dos ensaios em laboratório eram cor aparente e turbidez. Esses mesmos parâmetros eram analisados nas amostras de água pluvial coletadas durante as etapas de filtração em escala real e limpeza do filtro de pressão. Nas amostras coletadas antes e após o processo de filtração, analisavam-se, além dos parâmetros já mencionados: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, dureza total, sulfato, sólidos totais dissolvidos, sólidos sedimentáveis, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, DBO_{5,20}, concentração de coliformes termotolerantes e E. coli.

2.4 Estimativa da produção efetiva e do custo do sistema

A produção efetiva do sistema foi estimada a partir dos cálculos de volume de água pluvial utilizado na limpeza do filtro de pressão e volume de água pluvial potencialmente

captável (água que poderia ter sido captada considerando-se o volume de reserva como não sendo fator limitante).

A determinação do volume de água pluvial necessário para a limpeza do meio filtrante foi estimada a partir da análise da água de lavagem. O volume filtrado era controlado por medidor instalado a jusante do filtro de pressão. O cálculo do volume de água potencialmente captável foi feito a partir da Equação 2, conforme proposto pela NBR 15527:2007 (ABNT, 2007).

$$V = P \times A \times C \times \eta \text{ fator de captação} \quad (2)$$

Em que: V é o volume diário de água pluvial aproveitável, em litros; P é a precipitação diária, em milímetros; A é a área de captação em metros quadrados; C é o coeficiente de escoamento superficial da cobertura (no caso: 0,9, conforme Macintyre (1990)); e η fator de captação é a eficiência do sistema de captação.

A estimativa da produção efetiva do sistema foi realizada conforme Equação 3.

$$Pe = V - VL \quad (3)$$

Em que: Pe é a produção efetiva; V é o volume total; e VL é o volume gasto na limpeza do filtro de pressão.

A eficiência do sistema de filtração empregado foi calculada a partir da Equação 4:

$$E = (1 - R) * 100 \quad (4)$$

Em que: E = eficiência do sistema (%); R = Fração residual remanescente, correspondente a razão entre o valor residual e o valor inicial (-)

Para estimativa do custo do tratamento, inicialmente calculou-se o consumo gasto com o coagulante primário utilizado. Verificando-se que foram gastos, aproximadamente, 300 gramas de amido de milho para tratar 45 m³ de água (15 ensaios de filtração) e considerando-se o valor de 500 gramas do produto (em média, R\$ 4,50), calculou-se o valor gasto com os quinze ensaios e, depois, determinou-se o valor gasto por metro cúbico de água tratada.

Feito isso foi calculado o consumo, em kWh, das duas bombas utilizadas no processo de filtração empregado. Esse cálculo foi realizado levando-se em conta a potência das bombas e o tempo de uso de cada uma delas.

Em seguida foi multiplicado o consumo energético obtido pelo valor de kWh cobrado para usos residenciais. Esse valor de custo foi obtido em contato com a empresa Elektro de Rio Claro, SP em julho de 2010 (R\$ 0,3358 por kWh). Para efeito de comparação, utilizou-se o valor de cobrança de água tratada no município em janeiro de 2010 para a faixa de consumo entre 0 e 10 m³ (R\$ 10,89).

Adicionalmente, a partir do volume de água pluvial necessário para efetuar a limpeza do filtro de pressão, foi calculado o *first flush* equivalente, correspondente a essa quantidade de água descartada, levando-se em conta a área de captação em planta.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de estudo, foram coletadas dezoito precipitações, ocorridas entre os meses de novembro de 2009 e janeiro de 2010. Por se tratar de um período chuvoso, o tempo de estiagem entre uma coleta e outra foi curto, variando entre zero e três dias. A altura média de precipitação registrada foi 33,2 mm, menor que 10,3 mm (em 16/11/2009) e maior que 119,7 mm (ocorrida em 29/12/2009). As intensidades máximas de precipitação para a duração de 10 min variaram entre 0,8 mm.h⁻¹ (em 29/11/2009) e 18,8 mm.h⁻¹ (em 07/01/2010), apresentando uma média de 7,2 mm.h⁻¹ para as dezoito precipitações (chuvas) investigadas. Embora o período de estiagem durante o período de coleta das amostras tenha sido pequeno (média inferior a um dia), os resultados da Tabela 2 demonstram a grande variação de qualidade da água pluvial afluente ao sistema de tratamento.

Tabela 2 – Principais características das precipitações captadas durante o estudo.

Chuva	Data	Tempo estiagem (dias) *	Volume precipitado (mm) *	Intensidade precipitação máxima duração 10 min*	Cor aparente (uH)	Turbidez (UT)
1	08/11/2009	0	29,6	9,4	41	5,9
2	16/11/2009	3	10,3	2,4	142	12,5
3	24/11/2009	1	20,4	5,6	21	5,0
4	27/11/2009	1	41,3	9,3	97	38,5
5	29/11/2009	0	13,0	0,8	78	14,8
6	03/12/2009	3	33,0	9,2	120	37,5
7	08/12/2009	0	15,6	0,9	41	6,0
8	12/12/2009	0	13,7	3,6	116	33,5
9	18/12/2009	2	24,4	3,7	34	12,8
10	29/12/2009	0	119,7	7,0	55	7,4
11	30/12/2009	0	33,7	4,9	53	10,0
12	07/01/2010	0	19,2	18,8	52	7,7
13	15/01/2010	2	38,0	18,7	55	10,9
14	19/01/2010	0	48,5	9,4	104	16,1
15	22/01/2010	0	27,8	6,5	114	20,2
16	24/01/2010	0	33,3	9,0	124	20,8
17	26/01/2010	0	30,4	4,2	92	19,0
18	29/01/2010	0	45,7	6,2	76	16,5
Média		0,7	33,2	7,2	78,6	16,4
Desvio Padrão		1,1	24,3	5,1	36,2	10,5

Nota: (*) – dados fornecidos pelo Centro de Análise e Planejamento (CEAPLA) da UNESP de Rio Claro.

Em relação à cor aparente das chuvas, observou-se uma variação entre 21 e 142 uH e média aproximada de 79 uH. Já em relação à turbidez, observou-se valores que variaram entre 5 e 38,5 uT, com média aproximada de 16 uT. Acredita-se que os elevados valores apresentados pelas amostras ocorreram devido às intensidades das precipitações (chuvas). Isso, pois maiores intensidades de chuva geram maiores vazões, as quais resultam em maior quantidade de material transportado pela água escoada em superfície.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as médias de cor aparente e turbidez obtidas nos ensaios. A partir da observação dos resultados, pode-se perceber que ambos os parâmetros tiveram seu valor reduzido mais acentuadamente até o quinto minuto de filtração, permanecendo praticamente constante durante todo o restante da etapa, o que indica estabilidade da qualidade da

água produzida. Ressalta-se que a duração da carreira de filtração foi limitada à capacidade de estocagem (3m³).

Figura 4 – Cor aparente média durante as carreiras de filtração. As barras representam a amplitude total obtida de mínimo e máximo.

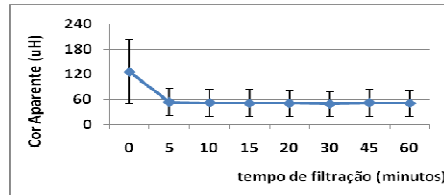
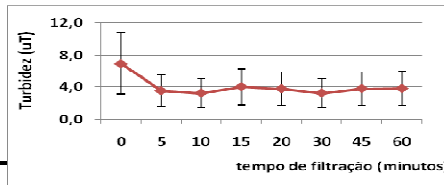


Figura 5 – Turbidez média durante as carreiras de filtração. As barras representam a amplitude total obtida de mínimo e máximo.



Os resultados obtidos considerando toda a carreira de filtração (amostra composta) para os parâmetros cor aparente e turbidez são mostrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Resultados obtidos em escala real para o parâmetro cor aparente.

Precipitação	pH de coagulação	Dosagem (mg.L ⁻¹)	Cor Aparente (uH)		Redução absoluta (uH)	Redução percentual (%)
			Água pluvial bruta	Água pluvial tratada		
1	4,7	6,0	41	16	25	61,0
2	6,0	2,0	142	135	7	4,90
3	7,2	3,0	21	17	4	19,0
4	5,1	6,0	97	51	46	47,4
5	4,8	5,0	78	47	31	39,7
6	5,2	12,0	120	69	51	42,5
7	6,1	6,0	41	36	5	12,2
8	6,6	6,0	116	69	47	40,5
9	6,5	11,0	34	28	6	17,6
10	6,1	11,0	55	45	10	18,2
11	5,7	4,0	53	45	8	15,1
12	5,8	7,0	52	45	7	13,5
13	5,9	11,0	55	36	19	34,5
14	6,8	1,0	104	68	36	34,6
15	6,0	7,0	114	55	59	51,8
16	5,8	0,0	124	108	16	12,9
17	6,8	0,0	92	55	37	40,2
18	7,3	0,0	76	61	15	19,7
Média			78,6	54,8	23,8	30,3

Nota: nos ensaios 16, 17 e 18 não houve aplicação de solução de amido natural de milho, por isso a dosagem foi referida como zero.

Da análise dos resultados obtidos no parâmetro cor aparente foi observada uma redução média de aproximadamente 24 uH, o que, em porcentagem, corresponde a cerca de 30%. Em termos absolutos, a maior redução encontrada no presente estudo ocorreu no 15º ensaio (chuva ocorrida em 22/01/2010; dosagem de solução de amido natural de milho: 7 mg.L⁻¹), no qual a cor aparente passou de 114 uH para 55 uH (redução de 59 uH). A menor redução, por sua vez, foi observada no 3º ensaio (chuva ocorrida em 24/11/2009; dosagem de solução de amido natural de milho: 3 mg.L⁻¹), no qual a cor aparente passou de 21 uH para 17 uH (redução de 4 uH). A baixa

redução da cor aparente está provavelmente associada ao uso do polímero como coagulante primário e a faixa de pH empregada no tratamento simplificado.

Tabela 4 – Resultados obtidos em escala real para o parâmetro turbidez.

Precipitação	pH de coagulação	Dosagem (mg.L ⁻¹)	Turbidez (uT)		Redução absoluta (uT)	Redução percentual (%)
			Água pluvial bruta	Água pluvial tratada		
1	4,7	6,0	5,9	2,5	3,4	57,6
2	6,0	2,0	12,5	8,8	3,7	29,6
3	7,2	3,0	5,0	2,1	2,9	58,0
4	5,1	6,0	38,5	9,9	28,6	74,3
5	4,8	5,0	14,8	5,9	8,9	60,1
6	5,2	12,0	37,5	15,4	22,1	58,9
7	6,1	6,0	6,0	5,4	0,6	10,0
8	6,6	6,0	33,5	11,6	21,9	65,4
9	6,5	11,0	12,8	4,6	8,2	64,1
10	6,1	11,0	7,7	4,7	3,0	39,0
11	5,7	4,0	10,0	6,9	3,1	31,0
12	5,8	7,0	7,7	6,9	0,8	10,4
13	5,9	11,0	10,9	3,4	7,5	68,8
14	6,8	1,0	16,1	11,4	4,7	29,2
15	6,0	7,0	20,2	5,9	14,3	70,8
16	5,8	0,0	20,8	15,6	5,2	25,0
17	6,8	0,0	19,0	7,0	12,0	63,2
18	7,3	0,0	16,5	8,5	8,0	48,5
Média			16,4	7,6	8,8	53,7

Nota: nos ensaios 16, 17 e 18 não houve aplicação de solução de amido natural de milho, por isso a dosagem é referida como zero.

Em relação aos resultados de turbidez, observou-se uma redução média de 9 uT, correspondente a cerca de 54% de remoção. Em termos absolutos, a maior redução encontrada no presente estudo ocorreu no 4º ensaio (chuva ocorrida em 26/11/2009; dosagem de solução de amido natural de milho: 6 mg.L⁻¹), no qual a turbidez passou de 38,5 uT para 9,9 uT (redução de 28,6 uT). A menor redução, por sua vez, foi observada no 7º ensaio (chuva ocorrida em 08/12/2009; dosagem de solução de amido natural de milho: 6 mg.L⁻¹), no qual a turbidez passou de 6,0 uT para 5,4 uT (redução de 0,6 uT). A grande variação na qualidade das águas pluviais coletadas pode explicar a variação no desempenho observado nos tratamentos. Entende-se que essa (variação da qualidade) é uma das principais diferenças existentes entre sistemas que tratam águas pluviais e àqueles usualmente empregados em tratamento de água para abastecimento. Moruzzi e Nakada (2014) discutem com mais detalhes a questão da variabilidade da água pluvial e a interferência na concepção do sistema de tratamento.

May (2009) estudou a utilização de um filtro rápido de pressão como tratamento de águas pluviais coletadas após passagem por telhado, mas sem utilização de qualquer produto para o processo de coagulação e/ou floculação. Os resultados obtidos pela autora indicaram uma redução média de cor aparente de 9,6 uH (de 21,6 uH para 12 uH) o que equivale, em termos percentuais, a uma redução de 44,4%. A redução de turbidez em termos absolutos foi de 1,3 uT (de 3,3 uT para 2,0 uT), o que representa, em termos percentuais, uma redução de 39,4%. Confrontando com os resultados desse artigo e considerando apenas os ensaios nos quais não houve adição de solução de amido natural de milho (precipitações 16, 17 e 18 – Tabela 1), tem-se que, para o parâmetro cor aparente, a redução média encontrada foi de 22,7 uH (de 97,4 uH para 74,7 uH) - ou 24,3%, em termos percentuais enquanto que, para

o parâmetro turbidez, a redução média encontrada foi de 8,4 uT (de 17,8 uT para 10,4 uT) – ou 45,6% em termos percentuais. Evidentemente, a qualidade da água pluvial, características do meio filtrante e condições de operação do filtro não permitem a comparação inequívoca dos dados, todavia foram verificadas remoções na mesma ordem de grandeza quando não foi utilizado coagulante.

Nas Figuras 6 e 7 são mostradas as concentrações de coliformes totais e E. coli encontradas nas amostras antes e após o processo de filtração em escala plena. Os resultados obtidos nos demais parâmetros investigados (pH, condutividade elétrica, alcalinidade, dureza total, sulfato, sólidos totais dissolvidos, sólidos sedimentáveis, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e DBO_{5,20}) mantiveram-se constantes na entrada e a saída do sistema (variação inferior a 8%) e, por essa razão, optou-se por não apresentá-los no presente texto.

Em relação à concentração de coliformes termotolerantes, a redução média encontrada nos ensaios foi de 4,0 x 10⁴ NMP/100 mL, sendo a maior redução a ocorrida no dia 07/01/2010 (concentração inicial = 2,4x10⁵ NMP/100 mL; concentração final = 1,0x10⁵ NMP/100 mL). A média de valores iniciais (água pluvial bruta) situou-se em 1,3 x 10⁵ NMP/100 mL enquanto que a média de valores pós-filtração foi de 9,2 x 10⁴ NMP/100 mL. Embora represente uma redução de 30%, o valor final observado apresentou, em média, quatro dígitos, o que significa elevada concentração de coliformes termotolerantes.

Figura 6 – Concentração de coliformes totais antes e após o processo de filtração.

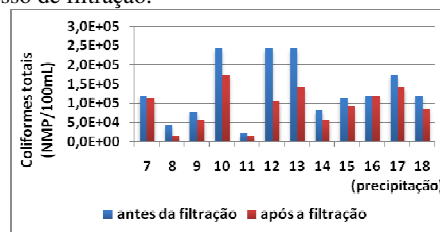
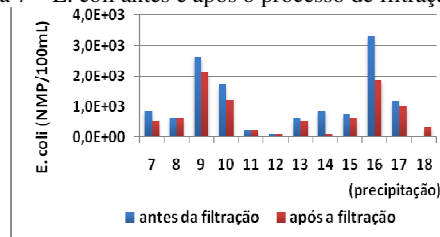


Figura 7 – E. coli antes e após o processo de filtração.



Para o parâmetro E. coli, a média de redução encontrada foi de 234,8 NMP/100 mL, sendo a maior observada de 14,7 x 10² NMP/100 mL (em 24/01/2010) e a menor nos dias 12/12/2009, 30/12/2009 e 07/01/2010, nos quais a concentração encontrada antes e após o processo foi a mesma.

A média de concentrações iniciais de E. Coli observada nos ensaios foi de 784,2 NMP/100 mL e a de concentrações finais (após filtração) de 549,4 NMP/100 mL. A variabilidade das concentrações na corrente de

entrada é apresentada em diferentes trabalhos, tais como: Nakada, Moruzzi (2014); Nakada, Moruzzi e Di Martini (2012). A remoção desses micro-organismos está ligada a diferentes fatores, tais como sua sobrevivência fora do ambiente entérico e a variações de temperatura no armazenamento. Murakami e Moruzzi (2008) apresentam o decaimento de coliformes no tanque bem como o desenvolvimento de bactérias heterotróficas. Posteriormente, Ahmed *et al.* (2012) também verificaram a qualidade microbiológica de águas pluviais armazenadas em caixas d'água onde foram detectadas *Enterococcus* spp., *Campylobacter* spp., *Salmonella* spp. e *Giardia lamblia*.

Em relação às recomendações da NBR 15527:2007 (ABNT, 2007), a qual versa sobre o aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis, embora existentes, as reduções observadas para o parâmetro cor aparente não foram suficientes para enquadrar a água pluvial tratada dentro do limite permitido ($< 15\text{uH}$), ficando a média observada (55uH) acima desse valor. No caso da turbidez, alguns ensaios resultaram em valores permitidos pela NBR 15527:2007 (ABNT, 2007) para usos menos restritivos ($< 5,0\text{uT}$), sendo a média encontrada (9uT) não muito superior a esse máximo. Tais resultados reforçam a necessidade de investigações complementares utilizando outros coagulantes primários, ou mesmo variando maiores faixas de dosagem de amido natural. Todavia, o propósito maior da investigação foi verificar a possibilidade do estabelecimento de procedimentos simples para aplicação em residências unifamiliares, sem a necessidade de conhecimentos e cuidados específicos, necessários em sistemas de tratamento similares aqueles encontrados em indústrias ou Estações de Tratamento de Água. Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os valores médios obtidos para os parâmetros cor aparente e turbidez durante a etapa de limpeza do filtro de pressão nos dezoito ensaios realizados.

Figura 8 – Cor aparente média durante a etapa de limpeza do filtro de pressão. Taxa de aplicação superficial de lavagem de $1.440\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ no sentido ascensional ($1\text{ m}/\text{min}$).

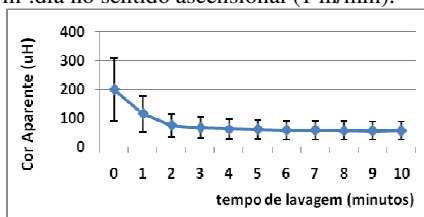
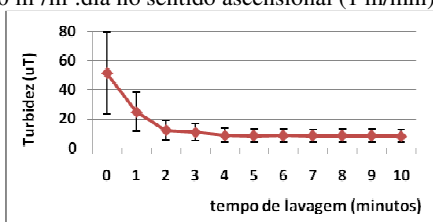


Figura 9 – Turbidez média durante a etapa de limpeza do filtro de pressão. Taxa de aplicação superficial de lavagem de $1.440\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ no sentido ascensional ($1\text{ m}/\text{min}$).



Pôde-se notar um padrão de redução semelhante em ambos os parâmetros investigados, com os valores iniciais reduzindo-se, de modo geral, até o terceiro minuto de lavagem, mantendo-se constantes nos minutos seguintes. Em termos de cor aparente, a média de redução nos três minutos iniciais foi de 133uH (diferença de cor aparente entre o primeiro e o terceiro minuto), o que, em porcentagem, equivale a 67%. Em termos de turbidez, a média de redução no mesmo período foi de 39uT , equivalendo a 76% da média.

Assumindo, então, que o tempo de 3 minutos foi representativo para a limpeza do meio filtrante, independentemente do volume filtrado de água (ou seja, da duração da carreira de filtração) e que o volume de reserva não seria fator limitante (extravazão igual a zero), estimou-se a produção efetiva do sistema para cada ensaio realizado, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Como se observa, o volume médio gasto para a limpeza do filtro de pressão utilizado no tratamento da água pluvial nos ensaios apresentados foi de 120 litros, o que equivale, comparativamente em relação à área de coleta do sistema (370 m^2) a um descarte de $0,32\text{ mm}$. Efetuando-se tal correspondência ao menor e maior valor de volume de água pluvial gasto para a limpeza do filtro têm-se descartes equivalentes a $0,13\text{ mm}$ (para 50 L) e $0,56\text{ mm}$ (para 210 L). Em todos os casos, o valor de descarte correspondente é inferior ao recomendado pela NBR 15527:2007 (ABNT, 2007), que é 2 mm .

Tabela 3 – Estimativa da produção efetiva do sistema.

Precipitação	Volume precipitado (mm)	Volume potencialmente captável (m^3)	Vazão da limpeza do filtro ($\text{L}/\text{min.}$)	Volume gasto na limpeza do filtro (m^3)	Produção efetiva do sistema (m^3)
1	29,6	8,76	25,0	0,08	8,68
2	10,3	3,05	17,6	0,05	3,00
3	20,4	6,04	27,6	0,08	5,96
4	41,3	12,22	32,7	0,10	12,12
5	13,0	3,85	40,0	0,12	3,73
6	33,0	9,77	30,0	0,09	9,68
7	15,6	4,62	50,7	0,15	4,47
8	13,7	4,06	32,1	0,10	3,96
9	24,4	7,22	34,6	0,10	7,12
10	119,7	35,43	40,7	0,12	35,31
11	33,7	9,98	41,3	0,12	9,86
12	19,2	5,68	66,0	0,20	5,48
13	38,0	11,25	69,7	0,21	11,04
14	48,5	14,36	33,7	0,10	14,26
15	27,8	8,23	27,3	0,08	8,15
16	33,3	9,86	58,1	0,17	9,69
17	30,4	9,00	68,9	0,21	8,79
18	45,7	13,53	44,4	0,13	13,4
Média	33,2	9,83	41,1	0,12	9,71

Embora a qualidade final da água pluvial tratada no presente estudo não tenha se adequadamente aos valores máximos exigidos pela norma NBR 15527:2007 (ABNT, 2007), a redução de cor aparente e turbidez gerada pelo tratamento foi, comparativamente, igual ou superior às reduções dos mesmos parâmetros encontradas por Murakami (2007) em amostras de água pluvial coletadas com e sem o descarte inicial de 2 mm da chuva. Enquanto para o processo de filtração a redução média de cor aparente ficou em torno de 30% (de $78,6\text{uH}$ para $54,8\text{uH}$, ou seja, $23,8\text{uH}$); para o processo de descarte ficou em 34% (de 26uH para 17uH , ou seja, 9uH). Em relação ao

parâmetro turbidez, a redução média observada no processo de filtração foi de 54% (de 16,4 uT para 7,6 uT, ou seja, 8,8 uT), enquanto que a redução encontrada no processo de descarte foi de 2% (de 3,32 uT para 3,25 uT).

Assim, indaga-se se o descarte da primeira chuva (*first flush*) é o procedimento suficiente em termos de redução dos valores iniciais de cor aparente e turbidez. A NBR 15527:2007 (ABNT, 2007) recomenda valores de descarte da primeira chuva entre 0,4 e 8 mm, sugerindo 2 mm na falta de resultados de experimentos. No entanto, no exemplo citado, as reduções obtidas no descarte de 2 mm foram semelhantes e inferiores ao tratamento cuja produção efetiva correspondia a um descarte médio de 0,3 mm, ou seja, 1,7 mm menor. Para a área de coleta empregada (370 m²), essa redução de descarte corresponde a uma perda (água não captada) de mais de 550 litros de água pluvial por milímetro de chuva precipitada.

Ademais, espera-se que a qualidade de água tratada possa ser ainda incrementada com adequações no processo, conferindo mais segurança ao aproveitamento. O uso de outro coagulante, base de tanino, tal como apresentado por De Martini e Moruzzi (2013) pode ser uma alternativa a qual resulta em maior eficiência do sistema.

Com relação à estimativa de custo com referência a janeiro de 2010, tem-se que o custo de amido de milho por metro cúbico de água tratada foi de R\$ 0,06/m³. O custo de energia elétrica para o mesmo período foi estimado em R\$ 0,04/m³. Assim, o custo para tratar a água pluvial armazenada foi de cerca de R\$ 0,10/ m³.

Em comparação ao custo da água tratada (sem incluir a taxa de esgoto), tem-se que para faixa de consumo de 0 a 10 m³, o valor estipulado é de R\$ 10,89 (no mínimo R\$ 1,09/m³). Assim, para o volume de água estudado no presente trabalho, a diferença de custo foi de R\$ 0,99/m³, equivalendo a uma economia de mais de 90%.

Tais custos são expeditos e foram estimados com base em valores médios e serviram somente para uma avaliação expedita de ordem de grandeza. Para um estudo mais aprofundado faz-se necessária a obtenção de um histórico confiável e representativo de dados, bem como uma análise econômica mais abrangente, considerando investimentos e custos de implantação do sistema.

Analisando a operacionalidade do sistema, acredita-se que a necessidade de um reservatório para acúmulo e posterior descarte da chuva inicial seja um complicador em situações onde o espaço físico é limitado. O volume do reservatório de descarte da primeira chuva pode chegar a 8 L/m² de telhado, ou seja 800 L para uma residência de 100 m². Supondo 1,5 m de altura média, seria necessário um espaço em planta de cerca de 0,75 m por 0,75 m (base quadrada).

Os dados apresentar nesse trabalho permitem visualizar a possibilidade de eliminação desse primeiro reservatório, fazendo com que a água coletada seja armazenada num único reservatório, ligado ao filtro de pressão. Nesse caso, a filtração seria realizada em ciclo contínuo, com recirculação da água, tal como ocorre em piscinas.

Outro aspecto que merece aprimoramento para trabalhos futuros é à forma como a solução de amido

natural de milho foi misturada. Em laboratório, a agitação foi constante e feita de forma que o coagulante primário atingisse toda a água existente no jarro. Já no caso em escala real, o procedimento de homogeneização foi realizado sem o auxílio de agitadores mecânicos, dada a própria necessidade de simplificação dos procedimentos operacionais. Tal fato pode ter prejudicado a mistura do coagulante primário no sistema de tratamento. Sugere-se a adoção de bomba dosadora e mistura em linha. Ademais, acredita-se que a concentração da solução estoque em escala real pode não ter sido suficiente para permitir a gelatinização adequada da matéria-prima, pois foi necessário aumentar a concentração da solução estoque. Em uso laboratorial, a solução tinha a concentração fixa de 2g/L. Em escala real, as concentrações variaram em função da dosagem requerida.

Analisando a solução de amido de milho como coagulante, acredita-se que embora ela seja feita de uma matéria-prima barata, a forma de preparação pode inviabilizar sua utilização em residências. Mesmo se houvesse uma dosagem de solução já definida como a mais adequada para qualquer qualidade de água pluvial bruta, a preparação da mesma seria um fator questionado por alguns consumidores, visto que a solução existe limitação no seu preparo e estocagem.

Assim, acredita-se que os resultados obtidos nesse trabalho permitem visualizar o potencial de utilização do sistema de tratamento simplificado e que este pode ser ainda aprimorado e, ainda, que a melhoria da qualidade da água pluvial tratada poderia ser obtida pelo emprego de outro coagulante e/ou por meio da melhoria da floculação, destacando que a simplicidade de operação deve ser requisito para a difusão em escala residencial.

4 – CONCLUSÃO

A remoção de turbidez variou de 25% (residuais de 20,8 uT para 15,8 uT) a 70,8% (residuais de 20,2 uT para 5,9 uT), nas diferentes precipitações captadas. A remoção de cor aparente variou de 4,9% (residuais de 142 uH para 135 uH) a 61% (residuais de 41 uH para 16 uH), nas diferentes precipitações captadas.

Verificou-se que o tempo de 3 minutos foi suficiente para a lavagem do meio filtrante, nas condições investigadas nesse trabalho, considerando taxa de aplicação superficial de lavagem de 1.440 m³/m².dia no sentido ascensional (1m/min).

Foram gastos, em média, 120 litros de água para a lavagem do filtro de pressão. Os valores gastos variaram de 50 litros a 210 litros, correspondendo a percentuais de 0,5 a 2,2% do volume potencialmente captável e a descartes equivalentes de 0,13 a 0,56 mm.

REFERÊNCIAS

AHMED, W.; HODGERS, L.; SIDHU, J. P. S.; TOZE, S. Fecal indicators and zoonotic pathogens in household drinking water taps fed from rainwater tanks in Southeast Queensland, Australia. **Applied and Environmental**

Microbiology, v. 78, n. 1, p. 219-226, 2012.
<https://doi.org/10.1128/AEM.06554-11>.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA, WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, 21th, Baltimore, Maryland, USA, 1995.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies 4th**. McGraw-Hill, 1990, 1194 p.

_____. **Examination of Water and Wastewater**. 21th. Denver. CP: AWWA, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15527**: água de chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – requisitos, São Paulo, 2007.

CAMPOS, J. R.; DI BERNARDO, L. **Uso de polímeros naturales en el tratamiento de aguas para abastecimiento**. Colombia: Universidad Del Valle. Ministerio de La Salude de Colombia, OMS, USP, 1988. 62 p.

DE MARTINI, M. V. P.; MORUZZI, R. B. **Tratabilidade de águas pluviais utilizando coagulante natural à base de tanino visando fins não potáveis**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 22, p. 15-23, outubro, 2013.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2^a edição. São Carlos: RiMa, v. 2, 2005, 1565 p.

GONÇALVES, R. F. **Uso Racional da Água em Edificações**. **Ricardo Franci Gonçalves (coord.)**. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB, 2006, 352 p.

KAHINDA, J-M. M; TAIGBENU, A. E.; BOROTO, J. R. Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**. v. 32, p. 1050–1057. Elsevier, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.007>.

KIM, R-H; LEE, S.; KIM, J-O. Application of a metal membrane for rainwater utilization: filtration characteristics and membrane fouling. **Desalination**, v. 177, p. 121-132, Elsevier, 2005.

LI, Z.; BOYLE, F.; REYNOLDS, A. Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. **Desalination**, v. 260, p. 1-8, Elsevier, 2010.

MACINTYRE, A. J. **Manual de instalações hidráulicas e sanitárias**. Ed. Guanabara, 1990.

MAY, S. **Caracterização, tratamento e reuso de águas cinza e aproveitamento de águas pluviais em edificações**. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária), 223 p. Universidade de São Paulo, 2009.

MURAKAMI, M. F. **Caracterização físico-química e microbiológica de diferentes amostras de uma precipitação coletada e armazenada após passagem por**

telhado. Rio Claro: UNESP, Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental. 2007, 51 p.

MURAKAMI, M. F.; MORUZZI, R. B. Avaliação de parâmetros microbiológicos de água pluvial visando aproveitamento para fins não potáveis: o efeito do tempo de armazenamento. **HOLOS Environment**, v. 8, n. 2, p. 1-4, 2008.

NAKADA, L. Y. K.; MORUZZI, R. B.; MARTINI, M. V. P. Estudo da qualidade de águas pluviais coletadas de diferentes telhados. In: XXXIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...** Salvador: ABES, AIDIS, 2012.

NAKADA, L. Y. K; MORUZZI, R. M. Variabilidade qualitativa de águas pluviais coletadas em telhado e sua importância na concepção do sistema de tratamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19. n. 1, jan/mar, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014000100001>.

XAVIER, R. P. **Influência de barreiras sanitárias na qualidade da água de chuva armazenada em cisternas no semiárido paraibano**. 114 p. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.