

TAMIRES LIMA DA SILVA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA PARA FINS DE REÚSO AGRÍCOLA EM
COMUNIDADES RURAIS E POPULAÇÕES TRADICIONAIS**

Botucatu

2019

TAMIRES LIMA DA SILVA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA PARA FINS DE REÚSO AGRÍCOLA EM
COMUNIDADES RURAIS E POPULAÇÕES TRADICIONAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román

Coorientador: Dr. João Gabriel Thomaz Queluz

Botucatu

2019

S586a

Silva, Tamires Lima da

Análise da eficiência de um sistema de baixo custo de tratamento de água residuária para fins de reuso agrícola em comunidades rurais e populações tradicionais / Tamires Lima da Silva. -- Botucatu, 2019

109 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez Román

Coorientador: João Gabriel Thomaz Queluz

1. Águas residuais. 2. Desinfecção de águas residuais. 3. Água Reuso. 4. Irrigação com águas residuais. 5. Tratamento de águas residuais. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO DE TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA PARA FINS DE REÚSO AGRÍCOLA EM COMUNIDADES RURAIS E POPULAÇÕES TRADICIONAIS


AUTORA: TAMIRES LIMA DA SILVA


ORIENTADOR: RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN

COORIENTADOR: JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Pós-Doutorando JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ
Instituto de Geociências e Ciências Exatas / UNESP/Rio Claro


Profa. Dra. TALITA APARECIDA PLETSCHE
Campus Montana / Instituto Federal do Espírito Santo - IFES


Prof. Dr. ROBERTO LYRA VILLAS BÔAS
Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Botucatu, 15 de julho de 2019

Dedico à minha família, em especial ao meu cunhado Felipe por me acompanhar na entrega da documentação do processo seletivo. À minha professora Talita, que teve papel fundamental para que eu conseguisse acreditar no meu potencial para a vida acadêmica. Ao meu grande amor Eric, pelo apoio, força e motivação. Eu não alcançaria esta conquista sem a ajuda de vocês.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de mestrado processo nº 2017/14729-3, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos de mestrado concedida de maio a outubro de 2017.

À Deus por iluminar meus passos e colocar pessoas de bom coração no meu caminho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Máximo Sánchez Román, pelos ensinamentos, paciência, orientação e por acreditar no meu trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Dr. João Gabriel Thomaz Queluz, pela orientação, ensinamentos e auxílio nas análises estatísticas e laboratoriais.

À Prof. Dra. Talita Aparecida Pletsch, pela amizade, apoio e principalmente pelo incentivo na busca por novas oportunidades. Saiba que você é meu modelo de inspiração como pessoa e profissional.

Aos meus queridos vizinha Francisca (dona Neta) e vizinho Milton, por terem me mostrado desde cedo a importância do trabalho honesto, da humildade de espírito e do amor ao próximo. Agradeço também, por vocês ficarem felizes junto comigo a cada conquista acadêmica alcançada, mesmo não entendendo o que é um artigo científico ou uma pesquisa de mestrado ou doutorado.

À minha amada família, minha mãe Maria José, meu padrasto Eduardo, meus irmãos Ketiane e Imack, pelo apoio, paciência e compreensão durante este período. Agradeço especialmente, meu cunhado Felipe, por fazer um sacrifício sobre-humano de dirigir por mais de 20 horas sem descanso para que eu conseguisse entregar minha documentação para o processo de seleção. O sacrifício feito por você para que eu conseguisse esta oportunidade acadêmica é minha inspiração para continuar forte nos momentos difíceis que enfrentei ao longo do caminho.

Ao meu amado Eric, pelo companheirismo, suporte e paciência. Obrigada por me acompanhar nas coletas, pelo auxílio no laboratório e por me apoiar em cada etapa. Eu não teria conseguido alcançar esta conquista sem você.

Meus sinceros agradecimentos aos meus colegas de pós-graduação, Bruno, Laércio, Valdemiro, Evanize, Mara, Osvaldir, Amanda, Kevim, Ana Cláudia, Wendy, Rocio, Rafael, Flávia, Alba, Renata, Franciana e João, pelas palavras de incentivo,

colaboração na realização de trabalhos acadêmicos e pelo companheirismo durante este período.

Aos meus companheiros de república, Leandro, Stephane, Larissa e Tayná por compartilhar um lar comigo e me proporcionar momentos de distração.

Aos funcionários e colaboradores do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas- FCA, em especial ao Gilberto, Israel, Fabiana e Rafaela pela amizade, apoio, carinho e suporte.

Aos professores Dr. João Carlos Cury Saad e Roberto Lyra Villas Bôas pela receptividade e auxílio no esclarecimento de dúvidas.

Ao professor Dr. Enzo Dal Pai, pela disponibilização dos dados meteorológicos e auxílio na análise da radiação solar global horária.

À professora Dra. Luciene Maura Mascarini Serra, pelo auxílio nas análises de ovos de Helmintos.

Ao professor Dr. Pedro de Magalhães Padilha e ao estudante de pós-doutorado Dr. José Cavalcante Souza Vieira pelo auxílio nas análises de turbidez.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo-SABESP pelo fornecimento da água residuária.

Aos funcionários das Fazendas de ensino, pesquisa e extensão- FEPE da FCA pelo transporte da água residuária até a área experimental, em especial ao supervisor Flávio por todo suporte dado ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este objetivo fosse alcançado.

RESUMO

Comunidades rurais e populações tradicionais possuem um déficit de atendimento de serviços de saneamento básico, principalmente coleta e tratamento de esgoto. Em pequenos núcleos rurais e assentamentos de povos tradicionais é comum a prática da agricultura, principalmente para a produção de hortaliças. O tratamento da água residuária proveniente de esgoto doméstico para reúso agrícola pode promover melhorias ambientais, sociais e econômicas. Tecnologias de tratamento de água residuária doméstica (ARD) descentralizadas, de fácil instalação, operacionalidade e baixo custo são as opções mais viáveis para instalação em núcleos rurais e assentamentos de povos tradicionais. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência de um sistema de baixo custo de tratamento de água residuária doméstica composto por leito biológico filtrante (LBF) e reator de desinfecção solar (SODIS) para fins de reúso agrícola em comunidades rurais e populações tradicionais. O sistema de tratamento experimental foi instalado na Faculdade de Ciências Agrônomicas-FCA, Unesp, Botucatu-SP. Foram utilizados três leitos biológicos filtrantes (LBF's) instalados em paralelo. Cada LBF apresentava volume útil de $0,16 \text{ m}^3$ e consistia de quatro caixas d'água retangulares de fibra de vidro, ligadas em série, preenchidas com meio suporte brita #0 a uma altura de 30 cm. Durante o período de pesquisa a vazão média do efluente secundário proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Botucatu-ETE Lageado liberada nos LBF's foi de $0,15 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. O tempo de detenção hidráulica da ARD em cada LBF foi de aproximadamente 1,06 dia. A eficiência dos LBF's foi avaliada pela análise dos parâmetros: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST), sólidos totais (ST), sólidos dissolvidos totais (SDT), turbidez, pH, nitrogênio total (N), fósforo (P), potássio (K), condutividade elétrica (CE), coliformes totais, *Escherichia coli* (*E. coli*) e ovos de helmintos. A ARD tratada nos LBF'S era direcionada para três reatores SODIS (*Solar Disinfection*) de coloração preta, que apresentavam base de concreto e formato de tronco cônico invertido, nos quais as lâminas de ARD de 10, 15 e 20 cm foram testadas para verificar qual delas seria mais eficiente na inativação de coliformes fecais (*E. coli*). As três lâminas ficaram expostas à radiação solar por um período de 10 horas (das 08:00 às 18:00 horas) sendo os parâmetros: radiação solar global, temperatura, pH, DQO e *E. coli* monitorados. Para avaliar a

influência das variações da radiação solar ao longo das estações do ano na eficiência do processo de desinfecção, foram realizadas coletas em dois períodos: de maio a julho de 2018 (período outono-inverno), e de dezembro de 2018 a março de 2019 (período primavera-verão). Os LBF's apresentaram eficiência média de remoção de 50,9%, 86,2%, 95,8%, 41,6%, 97,8% para DBO, DQO, SST, ST e turbidez, respectivamente. A ARD tratada pelos LBF's e direcionada aos reatores SODIS, após quatro horas de exposição à radiação solar, nos dois períodos testados, apresentou qualidade em acordo com a diretriz estabelecida pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para irrigação irrestrita (coliformes fecais ≤ 1.000 NMP 100 mL⁻¹). Na comparação das lâminas de ARD com 10, 15 e 20 cm de profundidade através da análise de variância- ANOVA, com a variável resposta a razão (N/No), em que (No) população de *E. coli* inicial e (N) população de *E. coli* remanescente após exposição solar, não foi identificada diferença significativa entre as lâminas testadas. Foram gerados modelos matemáticos que representam a fração da população remanescente de coliformes fecais (N/No) em relação à dose de radiação solar global acumulada nos reatores SODIS. Com os resultados das concentrações de N, P e K na ARD, seu potencial nutricional para produção de hortaliças foi estimado em 536,1 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio; 157,68 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de fósforo e 504,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de potássio. A combinação dos métodos de tratamento: LBF e SODIS é uma solução sustentável, de baixo custo e manutenção que pode promover o uso seguro de ARD na irrigação de parcelas agrícolas em comunidades rurais e populações tradicionais.

Palavras-chave: Irrigação. Desinfecção solar. Leito biológico filtrante. Reúso de água residuária doméstica.

ABSTRACT

Rural communities and traditional populations present a lack of basic sanitation services, as collection and treatment of sewage. In small rural areas and settlements of traditional people is common the practice of agriculture, mostly for vegetable production. Domestic wastewater treatment (DWW) for agricultural reuse can promote environmental, social and economic improvements. Decentralized technologies for DWW of easy installation, operationality and low-cost are the most viable options for installation in rural areas and settlements of traditional people. The objective of this research was to evaluate the efficiency of a low-cost system of domestic wastewater treatment consisting of biological filter bed (BFB) and solar disinfection reactor (SODIS) for the purpose of agricultural reuse in rural communities and traditional populations. The pilot study was conducted at College of Agronomic Sciences- FCA, UNESP, Botucatu-SP, Brazil. Three biological filter bed (BFB's) installed in parallel were used. Each BFB presented an effective volume of 0.16 m³ and consisted of four rectangular fiberglass water boxes, connected in series, filled with gravel (size range 4.8 mm-9.5 mm) to a height of 30 cm. During the research period, the secondary effluent from Botucatu City Wastewater Treatment Plant (WWTP-Lageado) used as affluent for the BFB's, presents an average flow of 0.15 m³ d⁻¹. The hydraulic detention time of the DWW in each BFB was approximately 1.06 days. The efficiency of the BFB's was evaluated by the analysis of the following parameters: biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), total solids (TS), total dissolved solids (TDS), turbidity, pH, total nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), electrical conductivity (EC), total coliforms, *Escherichia coli* (*E. coli*) and helminth eggs. The DWW treated by the BFB's was directed to three black coloured solar disinfection reactors (SODIS), that presented a concrete base and shape of an inverted truncated cone, where three fixed depths of DWW (10, 15 and 20 cm) were tested in order to verify which of them would be more efficient in inactivating fecal coliforms (*E. coli*). These three DWW depths were exposed to solar radiation for a period of 10 hours (from 08:00 a.m. to 6:00 p.m.) and the parameters of global solar radiation, temperature, pH, COD and *E. coli* were monitored. With the goal of evaluating the influence of the solar radiation variations along the year on the efficiency of the disinfection process, DWW samples were collected in two periods: from May to

July 2018 (Autumn-winter period), and from December 2018 to March 2019 (Spring-summer period). The BFB's presented average removal efficiency of 50.9%, 86.2%, 95.8%, 41.6%, 97.8% for BOD, COD, TSS, TS and turbidity, respectively. The DWW treated by the BFB's and directed to the SODIS reactors after four hours of exposure to direct sunlight, in the two periods tested, presented quality in accordance with the World Health Organization (WHO) guideline for unrestricted irrigation (Fecal coliforms ≤ 1.000 MPN 100 mL⁻¹). Comparing the fixed DWW depths of 10, 15 and 20 cm by the analysis of variance-ANOVA, with the response variable the ratio (N/No), in which (No) represents the initial population of *E. coli* and (N) represents the remnant population of *E. coli* after exposure to solar radiation. The ANOVA results showed that there were no differences statistically significant between the DWW depth tested. Mathematical models representing the remaining fraction of fecal coliforms in the DWW (N/No), in relation to the global solar radiation dose accumulated on the SODIS reactors were developed. The concentrations of N, P and K in the DWW showed that it has a nutritional potential for vegetable production of 536.1 kg ha⁻¹ year⁻¹ of nitrogen; 157.68 kg ha⁻¹ year⁻¹ of phosphorus and 504.5 kg ha⁻¹ year⁻¹ of potassium. The combination of the treatment methods: BFB and SODIS is a sustainable low-cost and maintenance solution that can promote the safe use of domestic wastewater for irrigation of farmlands in rural communities and traditional populations.

Keywords: Irrigation. Solar disinfection. Biological filter bed. Reuse of domestic wastewater

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
Figura 1- A) Concentração dos recursos hídricos por Região B) Densidade demográfica por Região em hab. km ⁻²	24
Figura 2- Rendimento em condições irrigadas e não irrigadas das culturas arroz, feijão e trigo (2015)	27
Figura 3- Soluções de tratamento de esgoto doméstico utilizadas nos domicílios rurais do Brasil, por regiões (2010)	30
Figura 4- Representação gráfica do processo de formação do biofilme.....	44
Figura 5- Representação gráfica do espectro eletromagnético.....	47
Figura 6- Processo de inativação de microrganismos por radiação solar UV....	49
Figura 7- Variação diária média da radiação solar por mês durante o ano de 2016 para Botucatu-SP.....	52
Figura 8- Representação da relação entre nível de turbidez e a profundidade da água no processo de atenuação da radiação UV-A.....	53
Figura 9- Fotografia aérea da localização do sistema de tratamento	54
Figura 10- <i>Layout</i> do sistema experimental de tratamento de água residuária doméstica	55
Figura 11- Características do Leito Biológico Filtrante.....	56
Figura 12- Corte transversal do Leito Biológico Filtrante.....	56
Figura 13- Design do reator de desinfecção solar	57
Figura 14- Lâminas de ARD testadas nos reatores de desinfecção solar-SODIS	57
Figura 15- Medição da temperatura no SODIS.....	59
Figura 16- Análise de ovos de helmintos na água residuária doméstica	63
Figura 17- Eficiência e taxa de remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) dos leitos biológicos filtrantes em relação à taxa de aplicação superficial.....	72
Figura 18- Eficiência e taxa de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) dos leitos biológicos filtrantes em relação à taxa de aplicação superficial	73
Figura 19- Aspecto do efluente secundário proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Botucatu-ETE Lageado (A e B) e aspecto da ARD tratada pelos LBF's (C).....	74

Figura 20- Eficiência de remoção de sólidos suspensos totais, sólidos totais e turbidez pelos LBF's durante as etapas do experimento.....	75
Figura 21- Remoção em log de coliformes totais e <i>E. coli</i> durante as etapas do experimento.....	76
Figura 22- Variações de pH ao longo do tempo de exposição solar no período outono-inverno para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS	79
Figura 23- Variações de pH ao longo do tempo de exposição solar no período primavera-verão para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS	79
Figura 24- Concentração média de DQO ao longo do tempo de exposição solar no período outono-inverno para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS.....	80
Figura 25- Concentração média de DQO ao longo do tempo de exposição solar no período primavera-verão para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS.....	80
Figura 26- Variação da temperatura ao longo do tempo de exposição solar para ARD no reator com lâmina de 10 cm para os períodos primavera-verão e outono-inverno.....	82
Figura 27- Variação da temperatura ao longo do tempo de exposição solar para ARD no reator com lâmina de 15 cm para os períodos primavera-verão e outono-inverno.....	82
Figura 28- Variação da temperatura ao longo do tempo de exposição solar para ARD no reator com lâmina de 20 cm para os períodos primavera-verão e outono-inverno.....	83
Figura 29- Radiação solar global média acumulada ao longo do tempo de exposição solar da ARD nos períodos primavera-verão e outono-inverno.....	84
Figura 30- Gráfico de dispersão da radiação solar global acumulada em função do período de exposição solar da ARD nas etapas primavera-verão e outono-inverno.....	85
Figura 31- Curva de inativação da <i>E. coli</i> (em log ₁₀) na lâmina de água residuária doméstica com 10 cm de profundidade nos períodos outono-inverno e primavera-verão.....	89

Figura 32- Curva de inativação da <i>E. coli</i> (em log ₁₀) na lâmina de água residuária doméstica com 15 cm de profundidade nos períodos outono-inverno e primavera-verão.....	90
Figura 33- Curva de inativação da <i>E. coli</i> (em log ₁₀) na lâmina de água residuária doméstica com 20 cm de profundidade nos períodos outono-inverno e primavera-verão.....	90
Figura 34- Dados experimentais e estimados através do modelo de regressão não linear (equação 5) para todas as lâminas de água residuária doméstica tratada nos reatores SODIS.....	93
Figura 35- Dados experimentais e estimados através do modelo de regressão não linear (equação 6) para todas as lâminas de água residuária doméstica tratada nos reatores SODIS no período outono-inverno.....	94
Figura 36- Dados experimentais e estimados através do modelo de regressão não linear (equação 7) para todas as lâminas de água residuária doméstica tratada nos reatores SODIS no período primavera-verão	94
Quadro 1- Exemplos de riscos e vias de exposição associados ao uso de água residuária na agricultura	33
Quadro 2- Vantagens e desvantagens do uso de leitos biológicos filtrantes no tratamento de água residuária.....	45
Quadro 3- Efeito da atmosfera terrestre na absorção da energia eletromagnética.....	48
Quadro 4- Redução logarítmica de microrganismos patogênicos por desinfecção solar	50
Quadro 5- Datas das coletas de amostras de água residuária doméstica em cada etapa do experimento.....	58
Quadro 6- Parâmetros de qualidade da água residuária doméstica analisados e metodologias adotadas.....	60
Quadro 7- Características do piranômetro modelo CMP3.....	63

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1- Demanda de uso por atividade econômica (retirada, consumo e retorno) no Brasil em 2017.....	25
Tabela 2- Recomendações da qualidade microbiológica da água residuária para reúso na agricultura	38
Tabela 3- Diretrizes para interpretação da qualidade da água para irrigação	41
Tabela 4- Critérios para avaliação da qualidade da água de irrigação quanto ao risco de entupimento de emissores.....	42
Tabela 5- Radiação solar disponível em diferentes situações de cobertura de nuvens.....	52
Tabela 6- Características da água residuária doméstica na entrada (afluente) dos Leitos Biológicos Filtrantes.....	66
Tabela 7- Características da água residuária doméstica na saída (efluente) dos Leitos Biológicos Filtrantes.....	67
Tabela 8- Qualidade da água residuária doméstica tratada nos LBF's para reúso na irrigação.....	68
Tabela 9- Concentração de nutrientes de interesse agrônômico na água residuária doméstica tratada nos LBF's.....	70
Tabela 10- Concentração média de matéria orgânica na água residuária doméstica afluente e efluente dos LBF's.....	71
Tabela 11- Concentração média de sólidos suspensos totais, sólidos totais e turbidez na água residuária doméstica afluente e efluente dos LBF's.....	74
Tabela 12- Concentrações de coliformes totais e <i>E. coli</i> na água residuária doméstica afluente e efluente dos LBF's.....	75
Tabela 13- Concentração de DQO, SST e turbidez no período outono-inverno para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS.....	77
Tabela 14- Concentração de DQO, SST e turbidez no período primavera-verão para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS	78

Tabela 15- Variações médias da temperatura, dose de radiação solar global, concentração e redução logarítmica da população de coliformes fecais (<i>E. coli</i>) no período outono-inverno, para os SODIS com lâminas de ARD com 10, 15 e 20 cm de profundidade.....	86
Tabela 16- Variações médias da temperatura, dose de radiação solar global, concentração e redução logarítmica da população de coliformes fecais (<i>E. coli</i>) no período primavera-verão, para os SODIS com lâminas de ARD com 10, 15 e 20 cm de profundidade.....	87
Tabela 17- Reativação da bactéria <i>E. coli</i> após 48 e 72 horas do processo de desinfecção por radiação solar global nos reatores SODIS.....	91
Tabela 18- Simulação de cenários para verificação da dose de radiação solar global requerida na desinfecção solar da ARD para reúso na irrigação irrestrita	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1 Disponibilidade hídrica e demanda de uso dos recursos hídricos no Brasil.....	24
2.2 Desenvolvimento agrícola no Brasil e a importância da irrigação.....	26
2.3 Saneamento rural no Brasil e o potencial reúso agrícola de água residuária doméstica por comunidades rurais e populações tradicionais...	28
2.4 Reúso de água residuária doméstica na irrigação	31
2.5 Diretrizes e critérios de qualidade da água residuária doméstica para reúso agrícola.....	35
2.5.1 Diretrizes da Organização Mundial da Saúde-OMS.....	37
2.5.2 Diretrizes da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura- FAO.....	39
2.5.3 Critérios para avaliação do risco de entupimento de emissores em sistemas de irrigação por gotejamento.....	42
2.6 Tratamento da água residuária doméstica para reúso agrícola por comunidades rurais e populações tradicionais.....	43
2.6.1 Leito Biológico Filtrante.....	44
2.6.2 Desinfecção Solar.....	46
2.6.2.1 <i>Processo de desinfecção solar.....</i>	<i>47</i>
2.6.2.2 <i>Fatores que podem afetar o processo de desinfecção solar.....</i>	<i>51</i>
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	54
3.1 Características do local de realização do experimento	54
3.2 Características do sistema de tratamento.....	54
3.3 Coleta e análise das amostras.....	57
3.4 Determinação da radiação solar global.....	63
3.5 Análise dos resultados.....	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1 Características da água residuária doméstica afluyente dos Leitos Biológicos Filtrantes	66
4.2 Características da água residuária doméstica efluente dos Leitos Biológicos Filtrantes.....	67

4.3 Viabilidade do reúso agrícola da água residuária doméstica tratada nos Leitos Biológicos Filtrantes.....	68
4.4 Potencial fertilizante da água residuária doméstica tratada nos Leitos Biológicos Filtrantes.....	69
4.5 Eficiência dos Leitos Biológicos Filtrantes na remoção de matéria orgânica.....	71
4.6 Eficiência dos Leitos Biológicos Filtrantes na remoção de sólidos.....	73
4.7 Eficiência dos Leitos Biológicos Filtrantes na remoção de patógenos.....	75
4.8 Processo de desinfecção solar nos reatores SODIS.....	76
4.8.1 Variação da temperatura nos reatores SODIS.....	81
4.8.2 Variação da radiação solar global em função das estações do ano.....	84
4.8.3 Redução logarítmica da concentração de coliformes fecais na ARD.....	85
4.8.4 Reativação bacteriana.....	91
4.9 Modelo matemático.....	91
4.9.1 Simulação de cenários.....	95
5 CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

A distribuição espacial desigual dos recursos hídricos no Brasil aliada ao aumento na demanda de uso por diferentes atividades econômicas tem levado a buscas por fontes alternativas de água sendo a água residuária uma das opções com maior potencialidade de adoção.

No Brasil, entre as atividades econômicas de uso consuntivo dos recursos hídricos que utiliza um grande volume de água está a irrigação. Com a tendência de crescimento da população brasileira haverá maior demanda por alimentos que por consequência aumentará o consumo de água para irrigação, visto que a técnica de irrigar permite um aumento da produtividade da cultura cultivada e é imprescindível para a expansão de áreas agrícolas.

Para o dimensionamento de projetos de irrigação é extremamente importante analisar a qualidade da fonte de água disponível. Na análise de qualidade da água são observadas suas características biológicas, químicas e físicas. Em áreas irrigadas no Brasil, o principal problema enfrentado com relação a qualidade da água é a alta concentração de carga orgânica devido, principalmente, ao lançamento de esgoto doméstico não tratado.

Grande parte da população brasileira não possui acesso a serviços adequados de saneamento, da qual, a mais afetada são aquelas localizadas em comunidades rurais e áreas de assentamento de povos tradicionais (indígenas, quilombolas entre outros).

Entre os serviços de saneamento com maior déficit de cobertura no Brasil está a coleta e tratamento de esgoto doméstico. Esgoto doméstico pode ser definido como o efluente resultante da água utilizada diariamente na descarga de vasos sanitários, banho, lavagem de pisos, roupas, louças, e a água que escorre pelos ralos e pias. As soluções de tratamento de esgoto doméstico consideradas “adequadas” podem envolver soluções coletivas (coleta e direcionamento para Estações de Tratamento de Esgoto-ETE) ou individual (tanque séptico ou fossa séptica). Em contrapartida, soluções como fossas rudimentares (também chamadas de fossas negras), valas e despejo do esgoto bruto diretamente nos cursos d’água são consideradas como “não adequadas” por não envolver nenhum tipo de sistema de tratamento.

O termo “água residuária doméstica” (ARD) pode ser definido como a água proveniente do esgoto doméstico tratado ou não. Majoritariamente, a ARD é composta

por água, apenas uma pequena parcela equivale a microrganismos e substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas ou suspensas. A reutilização da ARD pode convertê-la em uma fonte de água para irrigação, disponível o ano todo e independente de variações climáticas, que pode contribuir para a manutenção ou aumento de áreas irrigadas em comunidades rurais e assentamentos de povos tradicionais. Também, a ARD pode fornecer nutrientes (principalmente nitrogênio, fósforo e potássio) e matéria orgânica para as culturas reduzindo assim, a necessidade de uso de fertilizantes inorgânicos.

Por outro lado, o reúso agrícola de ARD deve ser feito com cautela devido à presença de microrganismos patogênicos (protozoários, bactérias, vírus e helmintos). Estes microrganismos podem contaminar as águas subterrâneas, o solo, e as culturas cultivadas apresentando risco à saúde pública. Conjuntamente, devem ser observados os íons presentes na ARD e os potenciais impactos que estes podem ocasionar ao solo e as culturas. Para minimizar os efeitos negativos associados ao reúso de ARD devem ser observadas diretrizes que apresentam informações sobre os valores aceitáveis de parâmetros de qualidade da água residuária para irrigação. Os valores definidos como aceitáveis, ou não, são resultantes de diversos estudos desenvolvidos para a obtenção de índices seguros de uso.

A reutilização de forma segura da ARD em comunidades rurais e áreas de assentamento de povos tradicionais irá depender da eficiência do processo de tratamento adotado. Para estas localidades as melhores soluções tecnológicas serão aquelas que apresentam baixo custo de instalação e fácil operacionalidade. Dentre as tecnologias de baixo custo disponíveis para o tratamento de ARD pode-se destacar a filtração através de leitos biológicos filtrantes e a desinfecção solar.

O processo de filtração dos leitos biológicos filtrantes pode ser eficiente na diminuição da concentração da carga orgânica e inorgânica, na redução do nível de turbidez, na remoção de ovos de helmintos e partículas sólidas presentes na ARD, assim como, o processo de desinfecção solar pode ser eficiente na inativação de microrganismos patogênicos.

Dados da pesquisa realizada por Queluz (2016) sobre a análise da eficiência de alagados construídos para o tratamento de ARD, demonstram que o sistema controle, denominado como “Alagado construído 1: Sem cultivo de plantas” apresentou elevada eficiência na remoção de sólidos suspensos totais (SST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO),

entretanto, a remoção de coliformes fecais (*E. coli*) não atingiu valores recomendados pela Organização Mundial da Saúde-OMS para uso na irrigação. Este sistema sem cultivo de plantas pode ser definido como um leito biológico filtrante (LBF). Com o intuito de atingir o padrão de qualidade microbiológica a ARD após passar pelos LBF deve passar por processo de desinfecção.

Levando-se em consideração estes aspectos, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a eficiência de um sistema de baixo custo de tratamento de água residuária doméstica composto por leito biológico filtrante, modelo desenvolvido por Queluz (2016), e reator de desinfecção solar (SODIS), modelo desenvolvido por Queluz e Sánchez-Román (2014), para fins de reúso agrícola em comunidades rurais e populações tradicionais. Constituíram como objetivos específicos:

- i. Testar esta combinação de tecnologias de tratamento para águas residuárias provenientes de esgoto doméstico;
- ii. Determinar parâmetros físico-químicos e microbiológicos do efluente gerado pela combinação LBF + SODIS;
- iii. Avaliar a qualidade do efluente tratado para uso na irrigação de culturas;
- iv. Determinar a eficiência do sistema testado através de análises estatísticas.

A inativação bacteriana no reator SODIS pode variar de acordo com a profundidade da lâmina de ARD aplicada, portanto, constituiu como hipótese deste estudo:

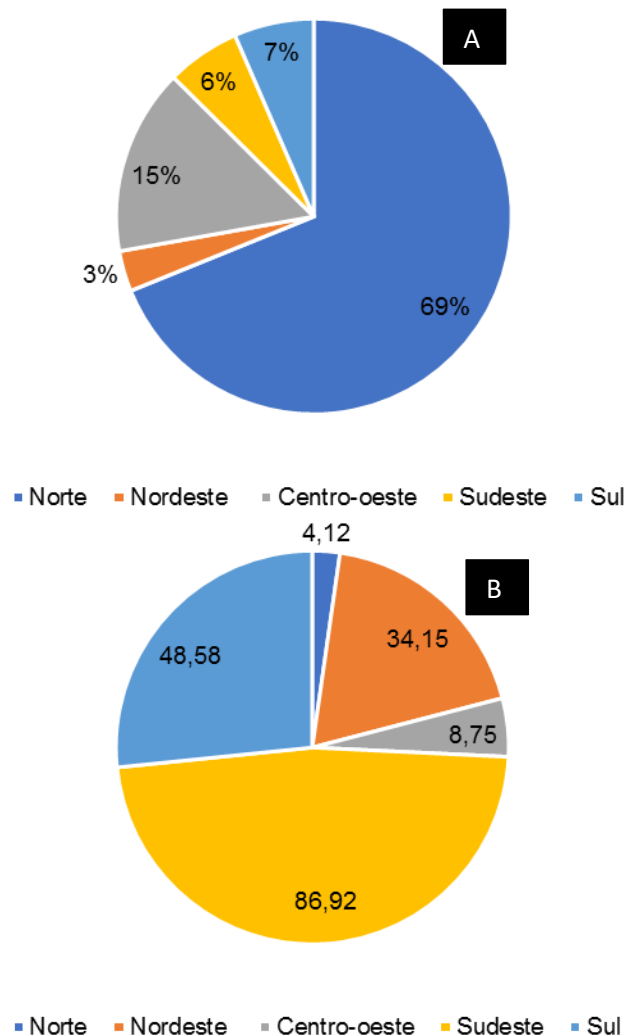
- H_0 : Não existe diferença significativa entre as três lâminas de ARD (10, 15 e 20 cm) testadas na inativação de coliformes fecais (*E. coli*) por radiação solar.
- H_1 : Existe diferença significativa entre as três lâminas de ARD (10, 15 e 20 cm) testadas na inativação de coliformes fecais (*E. coli*) por radiação solar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Disponibilidade hídrica e demanda de uso dos recursos hídricos no Brasil

O Brasil é um dos países com maior disponibilidade de água. Segundo dados da Agência Nacional de Águas-ANA (2018), a disponibilidade hídrica superficial no Brasil é em torno de $78.600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. No entanto, existe uma disparidade relevante entre disponibilidade hídrica e densidade demográfica. Por exemplo, a região Norte onde está localizada a bacia Amazônica, concentra 69% da quantidade de água disponível, enquanto que sua densidade populacional é igual à $4,12 \text{ hab. km}^{-2}$. Em comparação, a região Sudeste que concentra 6% dos recursos hídricos disponíveis apresenta uma densidade populacional de $86,92 \text{ hab. km}^{-2}$ (Figura 1).

Figura 1- A) Concentração dos recursos hídricos por Região B) Densidade demográfica por Região em hab. km^{-2}



Fonte: Concentração dos recursos hídricos: Pereira Júnior (2004); Densidade demográfica: IBGE (2010)

Com relação à demanda pelos recursos hídricos, segundo o “Relatório conjuntura dos recursos hídricos no Brasil” divulgado pela ANA em 2018, a demanda pelo uso de água no país está aumentando, com um crescimento estimado de aproximadamente 80% no total de água retirada nas últimas duas décadas, sendo projetado um aumento de 24% até 2030. Segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2018) a população brasileira terá um crescimento de 7,1% até 2030 passando de aproximadamente de 209 milhões de habitantes para 224 milhões de habitantes. Este crescimento resultará em uma maior demanda por água, principalmente para a produção de alimentos.

A quantidade de água utilizada pelas atividades econômicas pode ser classificada como consumo, retirada e retorno. O consumo equivale a água retirada que não retorna diretamente aos corpos hídricos. A retirada é o valor equivalente à água captada para determinado uso, já o retorno é a parcela de água utilizada da retirada para determinado uso que retorna aos corpos hídricos, por exemplo a água retirada para abastecimento urbano ou rural que retorna através do lançamento de água residuária (ANA, 2018). Pode-se observar na Tabela 1 que a atividade de abastecimento rural ($6,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de $34,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e urbano ($397,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de $496,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) apresentam juntas um percentual de retorno elevado igual a 76,1% ($403,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de $530,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), enquanto que para a atividade de irrigação este percentual é baixo, apenas 26,9% ($291,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de $1.083,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). A irrigação apresenta menor valor porque grande parte da água retirada é consumida pelas plantas, outra parte é evaporada, outra se infiltra no solo e somente uma porção pequena escoar e atinge diretamente os corpos d'água (TESTEZLAF, 2017).

Tabela 1- Demanda de uso por atividade econômica (retirada, consumo e retorno) no Brasil em 2017

	Retirada ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Consumo ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Retorno ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Irrigação	1.083,6	792,1	291,5
Abastecimento Urbano	496,2	99,2	397,0
Abastecimento Rural	34,5	27,6	6,9
Indústria	189,2	101,7	87,5
Mineração	32,9	9,6	23,3
Termelétrica	79,5	2,5	77,0
Uso animal	166,8	125,1	41,7

Fonte: ANA (2018)

A irrigação corresponde à prática agrícola que utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas para aplicar água artificialmente às plantas para satisfazer ou complementar suas necessidades hídricas (TESTEZLAF, 2017).

Braga e Lima (2014) afirmam que pelo fato da irrigação tolerar o uso de águas de qualidade inferior quando comparada à qualidade requerida para abastecimento humano, o uso de ARD como fonte de água para irrigação de culturas apresenta-se como uma solução racional, viável e sustentável capaz de impactar positivamente e mais rapidamente na redução da retirada e consumo dos recursos hídricos, além de contribuir para minimizar o lançamento de efluentes nos corpos d'água.

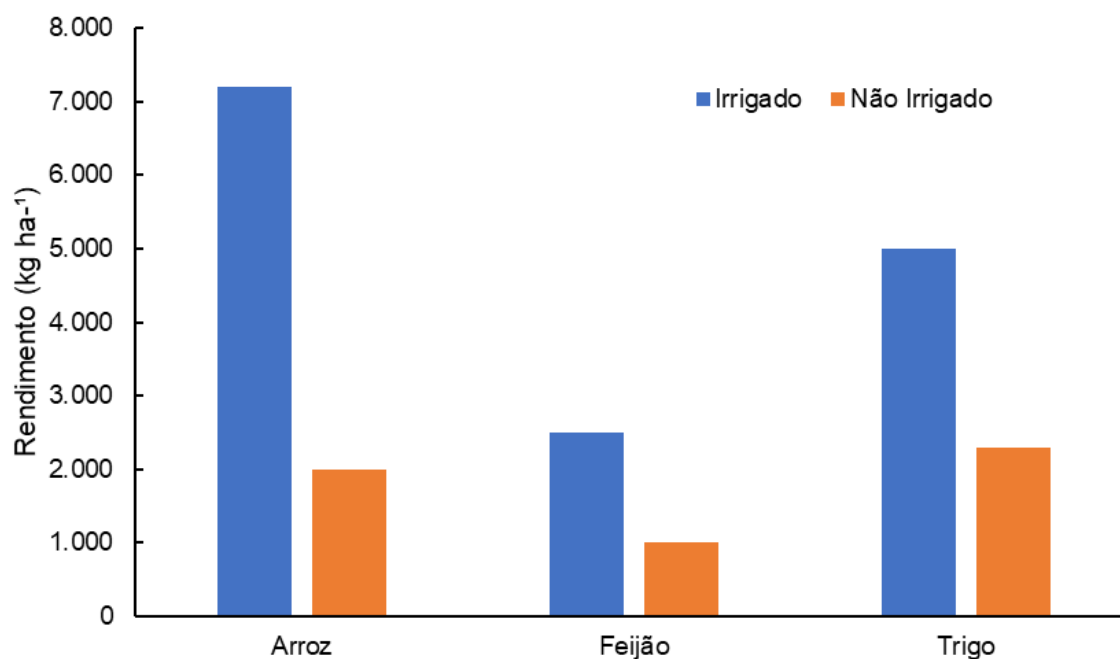
2.2 Desenvolvimento agrícola no Brasil e a importância da irrigação

O maior desafio enfrentado pela atividade agrícola atualmente é o alcance da lucratividade, que corresponde ao valor efetivo ganho em relação ao investimento realizado na produção de uma determinada cultura (LAMAS, 2018).

A irrigação é fundamental para o aumento da lucratividade agrícola sendo responsável pelo aumento da produtividade da ordem de 2 a 3 vezes em relação à agricultura de sequeiro; melhoria na qualidade do produto final; garantia de produção com relação às necessidades hídricas da cultura e redução dos riscos de quebra de safra por estresse hídrico; aumento no número de safras agrícolas por ano e colheita na entressafra; aplicação de agroquímicos e fertilizantes por meio do equipamento de irrigação; diminuição de gastos de mão-de-obra e redução do custo unitário de produção (TESTEZLAF, 2017; ANA & EMBRAPA, 2016).

O aumento da produtividade gerado pela irrigação desempenha um papel importante na garantia da segurança alimentar da população brasileira. A Figura 2 apresenta o rendimento das culturas arroz, feijão e trigo em condições irrigadas e não irrigadas (agricultura de sequeiro) em 2015. A produção irrigada apresentou rendimentos 3,6 (arroz), 2,5 (feijão) e 2,2 (trigo) vezes superiores à produção de sequeiro (ANA, 2017). De acordo com estudo desenvolvido por Borghetti et al. (2017), a produtividade média obtida para culturas irrigadas no país, geralmente é 2,7 vezes maior que a obtida através da produção de sequeiro, que é dependente da precipitação.

Figura 2- Rendimento em condições irrigadas e não irrigadas das culturas arroz, feijão e trigo (2015)



Fonte: Adaptado ANA (2017, p.14)

Segundo o Atlas da Irrigação, estudo divulgado pela ANA em 2017, o potencial de expansão da agricultura irrigada no Brasil será de aproximadamente 10,09 milhões de hectares (Mha) em 2030, um crescimento de 45% em relação ao levantamento realizado em 2015 que demonstrava uma área irrigada de aproximadamente 6,95 Mha (ANA, 2017).

A expansão da área irrigada no Brasil resultará numa maior pressão sob os recursos hídricos. Neste cenário, em prol do desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada faz-se necessário o planejamento integrado de reúso de água residuária tratada ao gerenciamento dos recursos hídricos. Santos et al. (2018) avaliou a capacidade disponível de reúso de ARD na bacia hidrográfica Paraíba do Sul, os resultados encontrados demonstram que a vazão estimada proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto (água residuária) presentes na região da bacia seria capaz de suprir 10% da demanda hídrica para a irrigação, após passar por processo de desinfecção. Essa ação equivaleria a manter nos corpos hídricos superficiais água suficiente para o abastecimento de aproximadamente 20 milhões de habitantes.

Testezlaf (2017) explica que a irrigação de cultivos agrícolas pode ser realizada por quatro métodos:

- a) Superfície -sistemas de irrigação por inundação, faixas ou sulcos;
- b) Aspersão-sistemas de irrigação por aspersão convencional ou mecanizada;
- c) Localizada- sistemas de irrigação por gotejamento e microaspersão;
- d) Subsuperfície- gotejamento subterrâneo, elevação do lençol freático e mesas de subirrigação.

A eficiência de aplicação da água poderá variar de acordo com o método/sistema adotado. De acordo com Andrade e Brito (2019), sistemas de irrigação por superfície podem apresentar menor eficiência de aplicação (30% - 80%) quando comparados com sistemas de irrigação localizada (80% - 95%) e por aspersão (75% - 90%). Contudo, nenhum sistema de irrigação apresentará 100% de eficiência de aplicação, ou seja, sempre haverá perdas de água por percolação profunda, evaporação, escoamento superficial e por arraste ou deriva pelo vento (TESTEZLAF, 2017).

A viabilidade do reúso agrícola de ARD tem sido amplamente estudada no Brasil (SOUZA et al., 2010; PLETSCHE, 2012; FREITAS et al., 2013; NASCIMENTO et al., 2018; SALES; SÁNCHEZ-ROMÁN, 2019) sendo adotado diferentes sistemas de irrigação. Portanto, não existe um sistema de irrigação mais “indicado” para projetos de irrigação com ARD, a seleção da melhor opção dependerá das características físico-químicas e microbiológicas do efluente tratado, das características do solo, topografia da área, necessidade hídrica da cultura e do nível socioeconômico do produtor.

2.3 Saneamento rural no Brasil e o potencial reúso agrícola de água residuária doméstica por comunidades rurais e populações tradicionais

A Lei 11.445/2007, que instituiu a Política Nacional de Saneamento Básico, tem como uma de suas diretrizes a garantia de meios adequados para o atendimento de populações tradicionais e comunidades rurais, mediante o uso de soluções compatíveis com suas características socioculturais e econômicas (BRASIL, 2007a). De acordo como Decreto Federal Nº 6.040/2007, que institui a política de desenvolvimento sustentável dos povos e comunidade tradicionais; Populações tradicionais podem ser definidas como:

Populações tradicionais são grupos culturalmente diferenciados e que se reconhecem como tais, que possuem formas próprias de organização social, que ocupam e usam territórios e recursos naturais como condição para sua reprodução cultural, social, religiosa, ancestral e econômica, utilizando conhecimentos, inovações e práticas gerados e transmitidos pela tradição (BRASIL, 2007b, p.1).

Saneamento básico refere-se ao serviço, infraestrutura e instalações operacionais com a finalidade de realizar o abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, manejo dos resíduos sólidos urbanos, drenagem urbana e de água pluviais (BRASIL, 2007a). Embora o conceito de saneamento englobe todas estas esferas citadas anteriormente, comumente, o termo saneamento é associado aos serviços de abastecimento de água e a coleta e tratamento de esgoto doméstico (TRATA BRASIL, 2019).

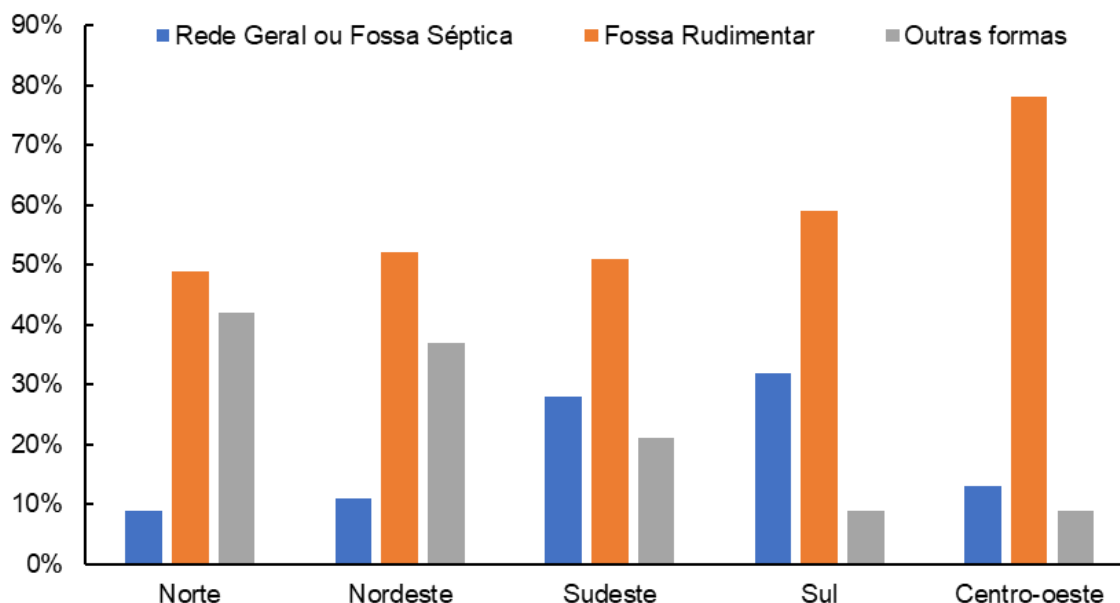
Dados do Censo Demográfico de 2010, realizado pelo IBGE, mostram que aproximadamente 30 milhões de brasileiros residem em áreas rurais, totalizando aproximadamente 8,1 milhões de domicílios (IBGE, 2010). A cobertura de serviços de coleta e tratamento de esgoto desta parcela da população apresenta déficit de atendimento, uma vez que, 54,2 % dos domicílios apresentam atendimento precário e 28,6% são considerados sem atendimento, ou seja, 82,8 % dos domicílios rurais não possuem soluções adequadas de tratamento de esgoto (FUNASA, 2017).

Em todo país grande parte da população residente em áreas rurais adotam soluções de tratamento de esgoto consideradas “inadequadas”, a exemplo do uso de fossas rudimentares¹ ou outras formas de disposição *in natura*. A Figura 3 apresenta o percentual das soluções de tratamento de esgoto adotadas nos domicílios rurais no Brasil, por regiões, destaca-se que em todas as regiões a fossa rudimentar é a solução mais usada. A região Centro-oeste apresenta um uso de fossas rudimentares relativamente maior que a média nacional (78%), enquanto que a região Sul apresenta um maior percentual de domicílios (32%) com uso de soluções “adequadas” de tratamento (ligações em rede geral ou fossa séptica²) (FUNASA, 2017).

¹ Fossas rudimentares ou negras consiste basicamente em uma escavação no solo para onde são direcionados a água e os dejetos. Podem contaminar o solo e as águas subterrâneas.

² Fossa séptica ou tanque séptico consiste em unidades pré-moldadas ou não com projeto dimensional em conformidade com as normas ABNT-NBR N° 7229/1993 e ABNT-NBR N° 13969/1997.

Figura 3- Soluções de tratamento de esgoto doméstico utilizadas nos domicílios rurais do Brasil, por regiões (2010)



Fonte: IBGE (2010); FUNASA (2017)

Tomando como exemplo a área rural do município de Ilha Solteira-SP, conhecida como “Cinturão Verde” que segundo dados do Censo 2010 (IBGE, 2010) possui 475 habitantes, e considerando um consumo médio per capita de 115 L d^{-1} , a demanda hídrica para a região seria igual à 54.625 L d^{-1} . Assumindo que o coeficiente de retorno fosse igual a 0,8 (ABNT, 1986), ou seja, 80% deste volume retornasse aos corpos hídricos teríamos um volume de ARD de 43.700 L d^{-1} que poderia ser utilizado para fins de irrigação após tratamento adequado. Supondo que a região apresente evapotranspiração de referência (ET_o)³ média igual a $3,2 \text{ mm d}^{-1}$ e que o sistema de irrigação utilizado possua uma eficiência de aplicação de 80%. O volume de ARD gerado (43.700 L d^{-1}) seria suficiente para irrigar diariamente uma área de aproximadamente 1,0 hectare. De acordo com Araujo (2005), o Cinturão Verde de Ilha Solteira foi organizado em um total de 90 lotes, sendo 14 irrigados e 76 de sequeiro. Nos lotes irrigados a área é igual à 2,5 hectares. Dessa forma, o volume tratado de ARD poderia atender à necessidade de irrigação diária de 40% da área irrigada.

O exemplo anterior, evidencia o grande potencial de reúso agrícola de água residuária por comunidades rurais e populações tradicionais. Infelizmente,

³ Foram considerados valores de ET_o porque a evapotranspiração da cultura (ET_c), que é utilizada no cálculo da lâmina de irrigação é variável de acordo tipo de cultivo e sua fase do ciclo fenológico.

segundo estudo desenvolvido por Rosato et al. (2009) na região do Cinturão Verde de Ilha Solteira a destinação final do esgoto doméstico são fossas rudimentares que representam risco de contaminação do solo e águas subterrâneas.

2.4. Reúso de água residuária doméstica na irrigação

A Resolução Nº 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos-CNRH de novembro de 2005, define água residuária como: “esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não” (CNRH, 2005). Assim, ARD pode ser definida como o efluente proveniente do esgoto doméstico tratado ou não.

O Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água (2017), divulgado pela Organização das Nações Unidas-ONU, aborda a importância da correta gestão das águas residuárias para fins de reúso. As águas residuárias podem ser fonte de nutrientes, energia, matéria orgânica e outros subprodutos úteis, rentáveis e sustentáveis. No contexto de uma economia circular, em que o desenvolvimento econômico é equilibrado com a proteção dos recursos naturais e a sustentabilidade ambiental, as águas residuárias representam um recurso amplamente disponível e valioso (WWAP, 2017).

A importância transversal das águas residuárias também é salientada no objetivo 6: “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos” (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2019), da Agenda da ONU para o Desenvolvimento Sustentável, que apresenta 17 objetivos que devem ser atingidos por todos os países do mundo até 2030, ela é citada diretamente na Meta 6.3:

“Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente” (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2019).

Segundo Jaramillo e Restrepo (2017), as maiores vantagens do reúso de ARD para irrigação são: diminuição da pressão sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos; aumento da produção agrícola em áreas de estresse hídrico; diminuição do custo com aquisição de fertilizantes inorgânicos; garantia da ciclagem de nutrientes de forma sustentável ao evitar o retorno indireto de macronutrientes, especialmente, nitrogênio e fósforo e microelementos aos corpos d’água (diminuição do risco de

eutrofização); fonte potencial de macronutrientes (N, P e K) e micronutrientes (Ca, Mg, B, Mg, Fe, Mn e Zn) para a cultura durante seu desenvolvimento fenológico, podendo aumentar seu rendimento.

As vantagens do reúso agrícola das águas residuárias de origem doméstica (ARD) são ressaltadas em diversos estudos. Marques et al. (2017) analisou o potencial da fertirrigação com ARD na economia de água e adubação química no cultivo de Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*). O efluente do tratamento preliminar de esgoto doméstico da Estação de Tratamento de Esgoto da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (ETE-Onça) foi aplicado via fertirrigação por meio de sulcos (sistema de irrigação superficial). O uso da ARD na fertirrigação do Capim-elefante foi capaz de substituir a necessidade de aplicação dos fertilizantes inorgânicos em: 100% para o pentóxido de fósforo (P_2O_5), 33% para o óxido de potássio (K_2O) e 93% para o nitrogênio (N). Esta substituição proporcionou uma economia financeira com adubação química de US\$ 445,00 ha⁻¹ (R\$ 1.677,25 ha⁻¹, na cotação de 24/07/2019). Com relação à economia hídrica o valor resultante foi US\$ 6,00 ha⁻¹ (R\$22,61 ha⁻¹, na cotação de 24/07/2019) no custo com água para irrigação.

Rebouças et al. (2010) analisaram o potencial da ARD como fonte hídrica e mineral para o cultivo de Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, em vasos plásticos de 12 L com delineamento experimental inteiramente casualizado com seis tratamentos e quatro repetições. A ARD utilizada era proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos Domésticos da Cajazeiras, cidade de Mossoró-RN. Na comparação de médias para os parâmetros área foliar, número de folhas, fitomassa seca do caule e folha e fitomassa total o tratamento com ARD apresentou valores superiores ao tratamento com água de abastecimento + adubação mineral, por exemplo, na produção de fitomassa total este aumento foi de 98%. Indicando que a irrigação com ARD é capaz de suprir as necessidades nutricionais do Feijão-caupi, aumentando sua produtividade sem necessidade de suplementação química.

Apesar das vantagens associadas ao uso de ARD na irrigação, o reúso agrícola de ARD apresenta limitações devido aos riscos associados com diferentes vias de exposição, grupos expostos e concentração físico química e microbiológica de certos parâmetros da qualidade da água (JARAMILLO E RESTREPO, 2017).

A irrigação com ARD apresenta maior risco de exposição a quatro grupos: (1) trabalhadores rurais e suas famílias; (2) trabalhadores que realizam a colheita dos cultivos; (3) consumidores; e (4) moradores que residem próximo as áreas irrigadas (SHAKIR; ZAHRAW; AL-OBAIDY, 2017). O Quadro 1 apresenta exemplos de riscos e via de exposição definidos pela Organização Mundial de Saúde relacionados ao reúso agrícola de água residuária.

Quadro 1- Exemplos de riscos e vias de exposição associados ao uso de água residuária na agricultura

Risco	Vias de exposição
Bactéria (<i>E. coli</i> , <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Salmonella spp.</i> , <i>Shigella spp</i>)	Contato; Consumo
Helmintos (<i>Ascaris</i> , <i>Ancylostoma</i> , <i>Necator</i> , <i>Hymenolepis</i> , <i>Strongyloides</i> , <i>Toxocara</i> , <i>Trichuris</i> , <i>Taenia spp</i>)	Contato; Consumo
Protozoários (<i>Giardia</i> , <i>Cyclospora</i> , <i>Cryptosporidium</i> , <i>Entamoeba spp</i>)	Contato; Consumo
Vírus (Hepatite A e E, Adenovírus, Rotavírus, Norovírus)	Contato; Consumo
Trematoda (<i>Clonorchis</i> , <i>Opisthorchis</i> , <i>Fasciola</i> , <i>Schistosoma spp.</i>)	Consumo
Metais Pesados (Arsênio, cádmio e mercúrio)	Consumo
Hidrocarbonetos halogenados (Dioxinas, furanos, Bifenilos policlorados)	Consumo
Pesticidas (Ex.: Aldrin, DDT)	Contato ¹ ; Consumo
Ftalatos e fenóis	Consumo ²

Fonte: Adaptado de WHO (2006) ¹ relacionado a prática de aplicação de pesticidas; ² Consumo de água proveniente de aquíferos que receberam contribuição da irrigação com água residuária para sua recarga.

Alterações nas características do solo (sodicidade, salinidade, acidez e alcalinidade) e possíveis danos às culturas (toxicidade) devido à irrigação com ARD tem sido objeto de muitos estudos (MEDEIROS et al., 2005; SANDRI, MATSURA e TESTEZLAF, 2006; YOON; KWUN; HAM, 2001; BECERRA-CASTRO et al., 2014). Abaixo estão descritos parâmetros de qualidade da ARD e suas correlações com os riscos associados ao reúso na agricultura irrigada:

- a) Sólidos Suspensos Totais (SST): Os SST podem se acumular na camada superficial do solo resultando em redução da sua taxa de infiltração (ABO-

GHOBAR, 1993); quantidade excessiva de SST provoca obstrução em sistemas de irrigação localizada (SILVA et al., 2017);

- b) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO): A DBO e a DQO têm relação com a carga orgânica e consumo de oxigênio. Devido à população de microrganismos (microbiota) no solo ser diversa, a inserção de água residuária com carga orgânica torna-se uma fonte de energia para estes microrganismos que possuem uma demanda por oxigênio. Se a carga orgânica cria um cenário onde a microbiota utiliza uma taxa maior de oxigênio que a capacidade de troca do solo pode resultar em falta de oxigênio na zona radicular das plantas (PEACOCK, MILLER E MARTIN, 2012).
- c) Nitrogênio: O nitrogênio pode ser reportado de várias formas, uma vez que é combinado em formas orgânicas e inorgânicas. O fator mais importante para as plantas é a quantidade total de nitrogênio (N), independentemente de estar na forma de nitrogênio-nitrato ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) ou nitrogênio orgânico (Org—N) (AYRES; WESTCOT, 1985). A água residuária de origem doméstica é rica em nitrogênio apresentando valores que variam entre 20 e 100 mg L⁻¹ (PESCOD, 1992). Se quantidades excessivas de N forem aplicadas, a cultura cultivada poder ter excesso de estimulação do crescimento, maturidade retardada ou apresentar baixa qualidade (AYRES; WESTCOT, 1985). Também, nitrato em quantidades excessivas pode não ser absorvido pelas plantas podendo ser fonte de contaminação de águas subterrâneas (PINTO et al., 2013).
- d) pH: Aumento do pH do solo devido a adição de cátions trocáveis e ânions; acidificação do solo devido às reações de nitrificação da NH_4^+ e a produção de ácidos orgânicos (MONTES et al., 2006). Com a elevação do pH do solo, os elementos Fe, Cu, Mn, Zn e Al sofrem redução da sua disponibilidade, em contrapartida, os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mo e Cl ficam mais disponíveis com o incremento do pH (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).
- e) Metais Pesados (Cádmio, Zinco, Níquel, etc.): Podem persistir no solo por muito tempo após sua introdução por não sofrerem degradação microbiana ou química. De acordo com Evans, Mitchell e Salau (1979 *apud* AYRES; WESTCOT, 1985, p. 95), 85% dos metais pesados aplicados no solo via irrigação com ARD se acumulam a poucos centímetros da superfície do solo

(0-20 cm de profundidade). Altas concentrações podem causar estresse abiótico nas plantas induzindo processos fisiológicos críticos e toxicidade (ALVES, REIS; GRATÃO, 2016).

- f) Microrganismos patogênicos: Riscos à saúde microbiana do solo devido a competição vital (CAVINATTO; PAGANINI, 2007).
- g) Concentração de íons e sais dissolvidos (Condutividade elétrica-CE, Sólidos Dissolvidos Totais -SDT, Razão de Adsorção de Sódio-RAS): Elevados teores de sais e certos íons na ARD podem causar problemas de salinidade, sodicidade e toxicidade. Problemas de salinidade irão ocorrer quando os sais presentes na água de irrigação se acumularem na dissolução do solo levando a um aumento do potencial osmótico que dificulta ou impede a captação de água pela cultura podendo resultar numa perda de rendimento. A salinidade pode ser expressa mediante a mensuração dos parâmetros CE e SDT (ALMEIDA, 2010). A sodicidade é dada pelo conteúdo de sódio (Na^+) na água. O excesso de sais de sódio afeta a estrutura do solo (problemas de permeabilidade) e pode provocar efeitos na nutrição e toxicidade das plantas (MARTINS et al., 2015; ALMEIDA, 2010). O parâmetro, comumente, adotado para observação do risco de sodicidade é a RAS, que é a proporção de sais de sódio em relação aos teores de cálcio e magnésio (TELLES; COSTA, 2010). Íons de cloro, sódio e boro, frequentemente encontrados em águas residuárias domésticas, podem provocar problemas de toxicidade. Absorvidos principalmente pelas raízes das plantas estes íons podem se acumular nas folhas mediante a transpiração podendo alcançar concentrações consideradas nocivas (ALMEIDA, 2010).

2.5 Diretrizes e critérios de qualidade da água residuária doméstica para reúso agrícola

Para regulamentação do reúso de água residuária no Brasil, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos-CNRH estabeleceu as seguintes resoluções:

- a) Resolução CNRH nº 54/2005: “estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável” (CNRH, 2005)
- b) Resolução CNRH nº 121/2010: “estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal definida na Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005” (CNRH, 2010).

Apesar do reúso agrícola ter sido regulamentado pela Resolução CNRH nº 121/2010, esta resolução não proporcionou maior desenvolvimento no uso água residuária pela agricultura. Entre os motivos está o fato de que no artigo 2º da resolução está definido: “Art. 2º As características físicas, químicas e biológicas para a água em todos os tipos de reúso para fins agrícolas e florestais deverão atender os limites definidos na legislação pertinente” (CNRH, 2010). Entretanto, legislação específica existente no Brasil que apresenta parâmetros físicos, químicos e biológicos da água e respectivos valores limites para uso na irrigação, é a Resolução CONAMA⁴ nº 357/2005 que “dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento [...]” (CONAMA, 2005), no entanto, esta resolução não determina critérios específicos de qualidade (características físicas, químicas e biológicas) da água residuária para reúso agrícola.

Além disso, o artigo 3º da referida resolução determina que: “Art. 3º A caracterização e o monitoramento periódico da água de reúso serão realizados de acordo com critérios definidos pelo órgão ou entidade competente [...]” (CNRH, 2010), porém não é definido na resolução qual seria o órgão ou entidade responsável pela definição de tais critérios.

Critérios de qualidade da água residuária são indicados pela Resolução CONAMA nº 430/2011 que “dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluente em corpos de água receptores” (CONAMA, 2011, p.1), ou seja, não contempla critérios de qualidade da água residuária para finalidade de reúso agrícola.

Abreu (2017) afirma que entre os objetivos do programa federal INTERÁGUAS- Programa de Desenvolvimento do Setor Água, está a elaboração de uma proposta de plano de ações para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil. Entre os objetivos específicos da proposta estão: (i) estudar e levantar as experiências nacionais e internacionais existentes; (ii) levantar as potencialidades de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil; (iii) avaliar o quadro regulatório existente; (iv) apresentar propostas de critérios de qualidade para água de reúso em função da sua finalidade e das tecnologias disponíveis; (v) propor modelos de financiamento ao reúso de efluente sanitário tratado, incluindo as políticas tarifárias a adotar; e (vi) apresentar um plano de ações para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil.

⁴ CONAMA- Conselho Nacional de Meio Ambiente

Diante do exposto, estudos realizados no Brasil para verificação da viabilidade do reúso agrícola de ARD têm adotado diretrizes e critérios internacionais.

2.5.1 Diretrizes da Organização Mundial da Saúde-OMS

Para encorajar o uso seguro, sem implicações para a saúde pública, de água residuária pela agricultura, a Organização Mundial da Saúde- OMS através do guia para uso seguro de água residuária, dejetos e águas cinzas (*World Health Organization- WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*) estabeleceu recomendações quanto à qualidade microbiológica da água residuária para irrigação. Estas recomendações tem influenciado a definição de normas técnicas ou desenvolvimento de políticas de reúso de água residuária em vários países que a adotaram ou adaptaram. São diretrizes projetadas com o intuito de proteger a saúde dos trabalhadores rurais e suas famílias, a comunidade local e os consumidores de produtos proveniente de culturas irrigadas com água residuária (WHO, 2006). A edição de 2006 substituiu as edições anteriores (1973 e 1989). O grande diferencial desta nova edição foi o emprego de ferramentas de avaliação de risco e a construção de diferentes cenários de exposição.

Bastos et al. (2008) analisou durante 18 meses o risco do uso de ARD proveniente de lagoas de estabilização na irrigação de diferentes hortaliças (alface, couve, rúcula, espinafre e pimentão verde). A irrigação com ARD contendo aproximadamente 10^5 de coliformes fecais 100 mL^{-1} (*E. coli*) pode resultar em níveis de contaminação de hortaliças que se desenvolvem distantes do nível do solo abaixo do padrão estabelecido pela Resolução-RDC Nº 12, de 02 de janeiro de 2001 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária- ANVISA (10^2 de coliformes fecais ou termotolerantes) para hortaliças consumidas *in natura* (cruas).

A Tabela 2 apresenta diretrizes da OMS quanto à qualidade microbiológica da água residuária para reúso agrícola.

Tabela 2- Recomendações da qualidade microbiológica da água residuária para reúso na agricultura

Atividade/Grupo de exposição	Qualidade microbiológica da água residuária ^c	
	<i>E. coli</i> 100 mL ⁻¹	Ovos de helmintos L ⁻¹
<i>Irrigação Irrestrita^a</i>		
Culturas que se desenvolvem dentro do solo (tubérculos, rizomas, bulbos e raízes tuberosas)	≤ 10 ³	≤ 1 ^d
Cultivo de folhosas	≤ 10 ⁴	
Irrigação localizada de culturas que se desenvolvem distantes do nível do solo	≤ 10 ⁵	
Irrigação localizada de culturas que se desenvolvem rentes ao nível do solo	≤ 10 ³	≤ 1
Qualidade alcançável com o uso de técnicas de tratamento como: tratamento secundário+coagulação+filtração+desinfecção	≤ 10 ¹ ou 10 ⁰	
<i>Irrigação Restrita^b</i>		
Mão de obra intensiva, agricultura de alto contato (elevada exposição)	≤ 10 ⁴	≤ 1
Agricultura altamente mecanizada e de alto nível tecnológico (ex.: uso de tratores e sistemas de irrigação automatizados) = menor exposição	≤ 10 ⁵	≤ 1
Tanque séptico associado ao uso de técnicas de irrigação com elevado potencial de minimização de exposição (ex.: Irrigação subsuperficial)	≤ 10 ⁶	

Fonte: Adaptado OMS-WHO (2006);

^aIrrigação irrestrita: uso de água residuária tratada para irrigação de culturas que são normalmente consumidas cruas; ^bIrrigação restrita: uso de água residuária para irrigação de culturas que não são consumidas cruas por humanos; ^cO monitoramento deve ser realizado no ponto de uso ou no ponto de descarga de efluentes. A frequência de monitoramento deverá ser: (i) áreas urbanas: uma amostra a cada duas semanas para *E. coli* e uma amostra por mês para ovos de helmintos; (ii) áreas rurais: uma amostra por mês para *E. coli* e uma amostra a cada 1-2 meses para ovos de helmintos. ^dQuando crianças com menos de 15 anos de idade são expostas a áreas irrigadas com água residuária é necessário o emprego de técnicas de tratamento adicionais para alcançar uma qualidade de ≤ 0,1 helmintos ovo por litro) ou deverá haver a adoção de outras medidas de proteção da saúde (por exemplo, tratamento anti-helmíntico).

2.5.2 Diretrizes da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura-FAO

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura-FAO divulgou em 1992 diretrizes sobre o uso de água residuária na agricultura através da publicação: *“Wastewater treatment and use in agriculture - FAO Irrigation and Drainage Paper 47”* (PESCOD, 1992). As diretrizes se concentram na irrigação com água residuária que lida com requisitos de qualidade da água para uma ótima produção agrícola e minimização de impactos potenciais no solo e na cultura.

De acordo com Ayres e Westcot (1985) a água de irrigação com base na salinidade, toxicidade, sodicidade e riscos diversos pode ser classificada em três grupos: nenhuma restrição de uso; restrição de uso leve ou moderada; restrição de uso severa. Essas diretrizes gerais de classificação da qualidade da água ajudam a identificar problemas potenciais de produção agrícola associados ao uso de fonte de água convencionais (captação superficial e/ou subterrânea), contudo, elas são igualmente aplicáveis na análise de água residuária para fins de irrigação (PESCOD, 1992).

As recomendações quanto à qualidade da água foram definidas com a intenção de cobrir condições diversas normalmente encontradas na agricultura irrigada. Algumas hipóteses foram levantadas a fim de definir sua gama de usabilidade e se a situação da área irrigada for muito diferente das condições hipotéticas, as diretrizes devem ser ajustadas (AYRES; WESTCOT, 1985). As hipóteses estabelecidas para a determinação das diretrizes adotadas pela FAO (Tabela 3) são:

- a) Rendimento potencial: Ao considerar que não existe “nenhuma restrição de uso da água”, as culturas seriam capazes de atingir seu potencial máximo, sem necessidade de empregar práticas de manejo, enquanto que, “restrição de uso da água” indica a possibilidade de existir limitações na escolha da cultura ou que, visando a manutenção do potencial máximo de produção será necessária a utilização de práticas especiais de manejo. Assim, uma restrição de uso não significa que a água seja inadequada para uso na irrigação.
- b) Condições da área irrigada: São solos com boa drenagem e texturas que variam de franco-arenosa a franco-argilosa. Não existe nível freático sem controle nos dois metros superficiais do solo. O clima é semiárido a árido com baixas precipitações que não provocam uma significativa lixiviação de sais.

- c) Sistemas e tempo de irrigação: As culturas são irrigadas através dos sistemas de irrigação por superfície ou aspersão. A água é aplicada com pouca frequência, conforme necessário, e a cultura utiliza uma porção considerável da água disponível no solo (50% ou mais) antes da irrigação seguinte. Pelo menos 15% da lâmina aplicada percola abaixo da zona radicular (fração de lixiviação $\geq 15\%$). Estas diretrizes são muito restritivas para sistemas especializados de irrigação, como a irrigação localizada por gotejamento, que resulta em irrigações diárias ou frequentes, mas são aplicáveis à irrigação subsuperficial caso a lixiviação aplicada à superfície satisfizer os requisitos de lixiviação.
- d) Extração de água pela cultura: Cada cultura tem um padrão de extração de água, porém todas extraem água que é mais prontamente disponível na profundidade do sistema radicular. Em média aproximadamente 40% da água é supostamente extraída e tomada da primeira quarta parte superior da zona radicular; 30% da segunda; 20% da terceira e os 10% restante da quarta parte inferior. Cada irrigação atinge a parte superior da zona radicular e mantém-se em um nível de salinidade relativamente baixo. A salinidade aumenta com a profundidade e é maior na parte inferior da zona radicular. A salinidade média na solução do solo é três vezes maior que a da lâmina aplicada e representa a salinidade na zona radicular média a qual a cultura responde. Estas condições resultam em uma fração de lixiviação de 15-20% e turnos de rega que mantem a cultura adequadamente irrigada.
- e) Restrições de uso: Três graus de restrição de uso foram definidos: nenhum, leve a moderado e severo. As divisões foram feitas de forma arbitrária, uma vez que a mudança ocorre gradualmente e não fica claro um ponto de ruptura. Uma mudança de 10 ou 20% acima ou abaixo de um valor de referência tem pouco significado se considerado na perspectiva adequada e com outros fatores afetando o rendimento. Estudos de campo, ensaios de pesquisa e observações levaram a adoção dessas divisões, mas a habilidade de manejo da água de irrigação do usuário pode alterá-las. Os valores mostrados são aplicáveis em condições normais de campo que prevalecem na maioria das áreas irrigadas em regiões áridas e semiáridas do mundo.

Tabela 3- Diretrizes para interpretação da qualidade da água para irrigação

Problema Potencial	Unidade	Grau de Restrição		
		Nenhum	Leve a moderado	Severo
Salinidade				
Condutividade Elétrica (CE)	dS m ⁻¹	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
Sólidos Totais Dissolvido (SDT)	mg L ⁻¹	< 450	450-2.000	> 2.000
Infiltração (avaliar usando a RAS e CE)				
RAS = 0 - 3 e CE=		> 0,7	0,7 - 0,2	< 0,2
RAS = 3 - 6 e CE=		> 1,2	1,2 - 0,3	< 0,3
RAS = 6 - 12 e CE=		> 1,9	1,9 - 0,5	< 0,5
RAS = 12 - 20 e CE=		> 2,9	2,9 - 1,3	< 1,3
RAS = 20 - 40 e CE=		> 5,0	5,0 - 2,9	< 2,9
Toxicidade de íons específicos				
Sódio (Na ⁺)				
Irrigação por superfície	RAS	< 3,0	3,0 - 9,0	> 9,0
Irrigação por aspersão	meq L ⁻¹	< 3,0	> 3,0	
Cloro (Cl ⁻)				
Irrigação por superfície	meq L ⁻¹	< 4,0	4,0 - 10	> 10
Irrigação por aspersão	m ³ L ⁻¹	< 3,0	> 3,0	
Boro (B)				
	mg L ⁻¹	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
Efeitos diversos				
Nitrogênio (*NO ₃ -N)	mg L ⁻¹	< 5,0	5,0 - 30	> 30
Bicarbonato (HCO ₃) ^a	meq L ⁻¹	< 1,5	1,5 - 8,5	> 8,5
pH		Amplitude normal 6,5 - 8,0		

Fonte: Ayres e Westcot (1985) ^a unicamente aspersão foliar; * nitrato (NO₃)

2.5.3 Critérios para avaliação do risco de entupimento de emissores em sistemas de irrigação por gotejamento

O risco de entupimento de emissores em sistemas de irrigação por gotejamento está intimamente relacionado com a qualidade da água utilizada, sendo as principais fontes de água proveniente de recursos hídricos superficiais e/ou subterrâneos. Entretanto, esta situação vem mudando em direção a um maior uso de água residuária para irrigação. As águas residuárias apresentam qualidade diversa e, conseqüentemente, vários parâmetros de qualidade da água podem influenciar no entupimento de emissores (NAKAYAMA; BUCKS, 1991).

Baseado nas descobertas feitas através do estudo “*Trickle irrigation water quality and preventive maintenance*” (“Qualidade da água de irrigação por gotejamento e manutenção preventiva”) Bucks, Nakayama e Gilbert (1979) desenvolveram um sistema de classificação da água com o intuito de estabelecer critérios através da avaliação do risco potencial de entupimento de uma fonte de água de irrigação por gotejamento (Tabela 4). Segundo Nakayama e Bucks (1991) esta classificação pode ser usada como um guia para identificar potenciais riscos de entupimento bem como para selecionar e projetar sistemas de tratamento de água.

Tabela 4- Critérios para avaliação da qualidade da água de irrigação quanto ao risco de entupimento de emissores

Fatores que influenciam no entupimento de emissores	Grau de risco		
	Baixo	Moderado	Severo
Físico			
Sólidos Suspensos Totais (mg L ⁻¹)	< 50	50–100	> 100
Químico			
pH	< 7,0	7,0–8,0	> 8,0
Sólidos Dissolvidos Totais (mg L ⁻¹)	< 500	500–2.000	> 2.000
Manganês (mg L ⁻¹)	< 0,1	0,1–1,5	> 1,5
Ferro Total (mg L ⁻¹)	< 0,2	0,2–1,5	> 1,5
Sulfeto de Hidrogênio (mg L ⁻¹)	< 0,2	0,2–2,0	> 2,0
Biológico			
Número de Bactérias (nº mL ⁻¹)	< 10.000	10.000-50.000	> 50.000

Fonte: Bucks, Nakayama e Gilbert (1979)

2.6 Tratamento da água residuária doméstica para reúso agrícola por comunidades rurais e populações tradicionais

De acordo com Imhoff (1966), na decisão de qual processo de tratamento de água residuária deve ser adotado é necessário certificar-se da eficiência de cada unidade do processo, seu custo de implantação e as vantagens da adoção da técnica de recuperação para finalidade do reúso. A determinação da eficiência de cada unidade do processo de tratamento pode ser feita com a indicação em porcentagem da redução das impurezas do efluente em comparação com as do afluente. Vários parâmetros químicos, físicos e microbiológicos podem ser o “elemento de comparação”, por exemplo, demanda bioquímica de oxigênio, teor de sólidos suspensos, turbidez, bactérias do grupo coliforme entre outros. O custo de implantação é variável de acordo com a solução de tratamento selecionada, assim como, as vantagens da recuperação do efluente para reúso. No caso da recuperação de água residuária para fins agrícolas, a vantagem reside no aproveitamento de nutrientes com potencial fertilizante. Adicionalmente, as águas residuárias tornam-se fontes de água para irrigação.

A Lei 11.445/2007 que estabelece diretrizes para o saneamento básico definiu entre seus objetivos: “proporcionar condições adequadas de salubridade ambiental aos povos indígenas e outras populações tradicionais, populações rurais e de pequenos núcleos urbanos isolados, utilizando soluções compatíveis com suas características socioculturais” (BRASIL, 2007a). Dessa forma, as melhores soluções de tratamento de ARD para comunidades rurais e populações tradicionais são as que não demandam construção e manutenção dispendiosas ou que necessitem de recursos humanos qualificados para sua operação. Como exemplo de tecnologias de baixo custo e que apresentam fácil operacionalidade e manutenção estão a filtração e a desinfecção solar.

A adoção de um sistema de tratamento de ARD de baixo custo e simples operação para fins de reúso na agricultura poderá converter as águas residuárias em uma fonte de água e nutrientes disponível ao longo do ano que pode resultar em aumento da produção agrícola em comunidades rurais e populações tradicionais.

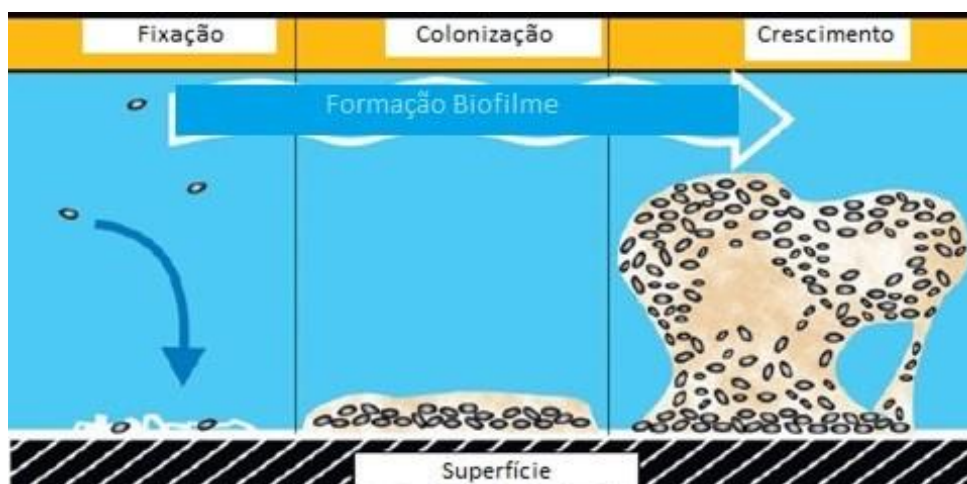
2.6.1 Leito Biológico Filtrante

Leito biológico filtrante (LBF) é um dos mais antigos processos de tratamento de água residuária. Foi utilizado pela primeira vez na Inglaterra em 1893 e desde então foi adotado com sucesso em outras regiões do mundo (SOLOMON et al., 1998). O princípio de funcionamento de um LBF é a biodegradação de poluentes pela ação de microrganismos ligados ao seu meio suporte, em vez de, retenção física como ocorre em filtros comuns. Meio suporte é o elemento filtrante, ou seja, os diferentes materiais utilizados no preenchimento do LBF, os materiais mais comuns são: espumas, pedras britas, cerâmica, e anéis de plástico. Geralmente, a escolha do material ocorre de acordo com a disponibilidade local e o custo para transporte.

Meller (2009) explica que na superfície do meio suporte ocorre a fixação e o desenvolvimento de microrganismos, que também se agrupam, na forma de flocos ou grânulos, nos interstícios do material criando um biofilme. Biofilmes podem ser definidos como camadas complexas de diferentes tipos de microrganismos (bactérias, fungos, algas e protozoários) que podem remover materiais orgânicos e inorgânicos presentes na água residuária (LEWANDOWSKI; BOLTZ, 2011).

A formação do biofilme pode levar alguns dias ou até meses, dependendo da concentração orgânica da água residuária. Desde que o desempenho do LBF depende em grande parte das atividades microbianas, uma fonte constante (aplicação contínua) de substâncias orgânicas e nutrientes é necessária para sua operação consistente e eficaz (CHAUDHARY et al., 2003). A Figura 4 apresenta uma representação gráfica do processo de formação do biofilme.

Figura 4- Representação gráfica do processo de formação do biofilme



Fonte: Adaptado de Lewandowski e Boltz (2011)

Os LBF's podem ser sistemas aeróbios ou anaeróbios. Em sistemas aeróbios o ar circula nos espaços vazios (porosidade) existentes no meio suporte, fornecendo o oxigênio para a respiração dos microrganismos. Do ponto de vista do processo, a porosidade do meio suporte pode resultar em uma maior facilidade com que os fluidos (efluente e ar) percolam através do meio promovendo uma melhor difusão de nutriente e oxigênio com o biofilme (GOMES, 2013).

Na avaliação da eficiência de um LBF devem ser observadas as características da água residuária afluente ao LBF (entrada) e efluente do LBF (saída). Os parâmetros de interesse são: concentração de sólidos suspensos totais-SST, concentração da demanda bioquímica de oxigênio-DBO e concentração da demanda química de oxigênio-DQO (JORDÃO; PESSOA, 2011).

O Quadro 2 apresenta as principais vantagens e desvantagens do uso de LBF's no tratamento de água residuária.

Quadro 2- Vantagens e desvantagens do uso de leitos biológicos filtrantes no tratamento de água residuária

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Boa eficiência de remoção de DBO e SST 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necessidade de tratamento e disposição final do lodo gerado
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixo consumo de energia 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perda de carga
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Não requer grandes áreas para instalação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Possíveis problemas de entupimento dos espaços vazios do meio suporte
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixa necessidade de manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Provável geração de odor
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simplicidade operacional 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Possíveis problemas com vetores e moscas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficaz no tratamento de água residuária com elevada carga orgânica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tratamento complementar pode ser necessário para adequar o efluente ao padrão necessário para reúso

Fonte: Adaptado de Nascimento (2001)

De acordo com Jordão e Pessoa (2011), a porcentagem de redução de organismos patogênicos no processo de tratamento em LBF é de 90-95% para vírus entéricos, 90-95% para bactérias, 50-90% para protozoários e 50-95% para helmintos. Todavia, vale ressaltar que um percentual de remoção elevado não garante que o efluente tratado apresentará qualidade necessária para reúso agrícola, por exemplo, caso a ARD afluyente do LBF apresente uma população média de bactérias *E. coli* igual a $1,0 \times 10^5$ NMP 100 mL⁻¹ e assumindo que a eficiência de remoção deste microrganismo pelo LBF fosse igual à 90%, teríamos uma ARD tratada (efluente do LBF) com população de coliformes igual à $1,0 \times 10^4$ NMP 100 mL⁻¹. Comparando este valor com as diretrizes da qualidade microbiológica da água residuária requerida para irrigação de culturas que se desenvolvem dentro do solo (tubérculos, rizomas, bulbos e raízes tuberosas), a ARD tratada no LBF não poderia ser utilizada para tal fim, uma vez que, apresenta valor superior ao valor limite estabelecido para *E. coli* (1.000 NMP 100 mL⁻¹) (Tabela 2).

Como o intuito de atingir o padrão de qualidade microbiológica da ARD recomendado para irrigação irrestrita pode-se adotar métodos para desinfecção da ARD. Entre as tecnologias de tratamento de baixo custo com comprovada eficiência na remoção de microrganismos patogênicos destaca-se o método de desinfecção solar.

2.6.2 Desinfecção Solar

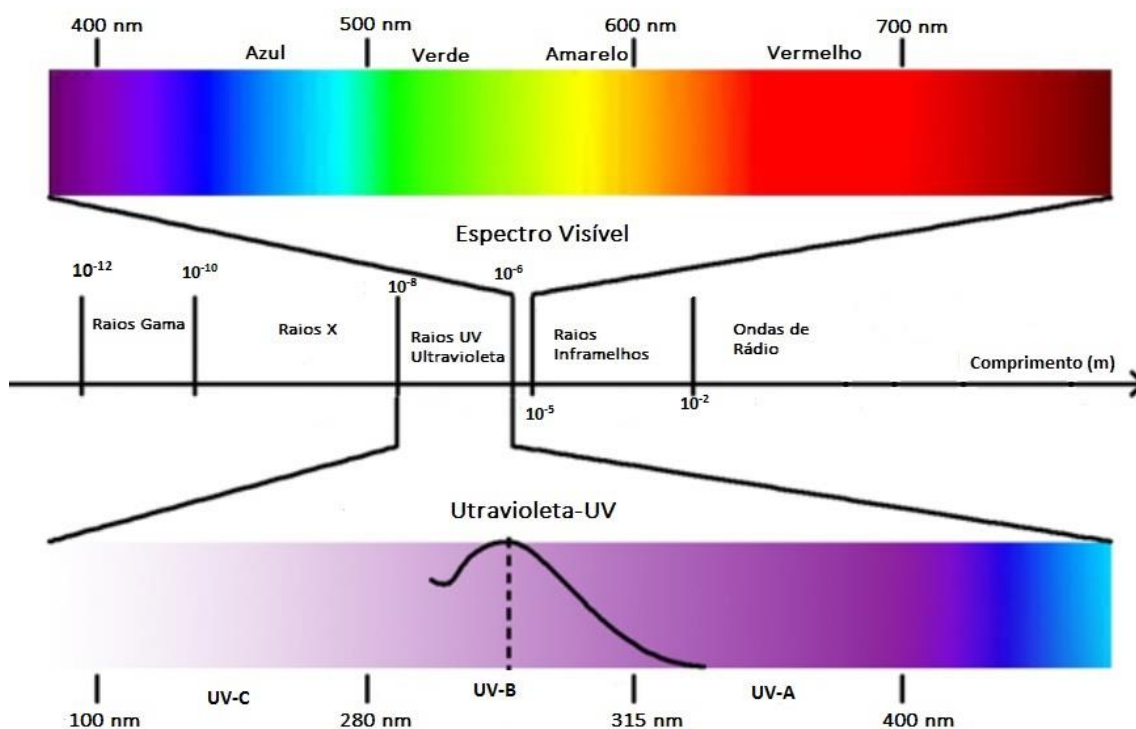
Desinfecção solar é o processo de inativação de agentes patogênicos através dos efeitos diretos da radiação solar (SANDEC, 2002). A ação germicida da luz solar sobre bactérias e outros organismos foram observadas em 1877 por Downes e Blunt, desde então diversos estudos foram desenvolvidos para entender melhor o processo (WARD, 1893; ACRA et al., 1989; VIVAR et al., 2017).

A utilização da desinfecção solar como método de tratamento de ARD apresenta inúmeras vantagens: não muda o gosto da água; é aplicável a nível doméstico; é simples de ser usado; utiliza recursos locais e energia renovável; apresenta baixos custos de investimento (PEREIRA et al., 2014). Devido a estas características, a desinfecção solar é um método perfeitamente aplicável em regiões menos favorecidas em infraestrutura e recursos financeiros, a exemplo de comunidades rurais isoladas e populações tradicionais.

2.6.2.1 Processo de desinfecção solar

A energia eletromagnética consiste em todo tipo de energia que viaja de sua fonte através do espaço na forma de ondas transversais⁵. Radiação é o termo que diz respeito a emissão e propagação da energia eletromagnética em forma de ondas (ACRA; RAFFOUL; KARAHAGOPIAN, 1984). A energia eletromagnética pode ser ordenada de forma contínua em função de sua frequência ou comprimento de onda, esta disposição é denominada de espectro eletromagnético (MORAES, 2002). A Figura 5 apresenta uma representação do espectro eletromagnético em função do comprimento de onda.

Figura 5- Representação gráfica do espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Wyckomar UV purification systems (2018)

De acordo com Moraes (2002), ao atravessar a atmosfera terrestre a energia eletromagnética pode ser refletida, absorvida e espalhada. Os gases presentes na atmosfera terrestre podem atuar como um “filtro” absorvendo energia eletromagnética. Os principais gases responsáveis por esta absorção são: oxigênio, gás carbônico, ozônio, monóxido de carbono, metano, nitrogênio, óxido nítrico e vapor d’água. A

⁵ Ondas onde a direção de vibração é perpendicular à direção de propagação.

radiação solar que chega à superfície terrestre é denominada radiação solar global que é constituída de duas componentes, referidas como “direta” e “difusa”.

O Quadro 3 apresenta o efeito da atmosfera terrestre na absorção da energia eletromagnética.

Quadro 3- Efeito da atmosfera terrestre na absorção da energia eletromagnética

Onda	Comprimento (nm)	Efeito da Atmosfera
Raios gama	< 0,03	Completamente absorvida pela camada superior da atmosfera.
Raios X	0,03-3	Completamente absorvida pela camada superior da atmosfera.
UV-C	100-280	Completamente absorvida pela camada de ozônio.
UV-B	280-315	Aproximadamente 90% é absorvida pela camada de ozônio.
UV-A	315-400	Transmitida através da atmosfera, porém o espalhamento atmosférico ⁶ é severo
Visível	400-700	Transmitida através da atmosfera com espalhamento atmosférico moderado das ondas mais curtas
Raios Infravermelhos	700-14 x 10 ³	A maioria é refletida. Parte é absorvida pelo vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio, com duas janelas atmosféricas. ⁷
Ondas de Rádio	> 1,0 x 10 ⁶	Refletida pela ionosfera

Fonte: Adaptado de Acra et al. (1989); Natural Resources Canada-NRCan (2015)

O espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra consiste em ondas: ultravioleta, visível e infravermelha. No processo de desinfecção solar da ARD são considerados os efeitos da radiação UV sobre a inativação de microrganismos

⁶Alteração da direção da energia eletromagnética em função da presença de moléculas ou partículas na atmosfera.

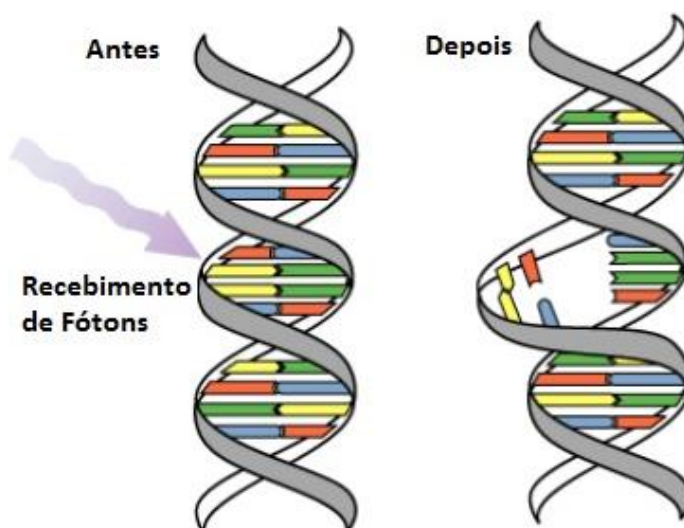
⁷ Regiões do espectro eletromagnético onde a absorção atmosférica é muito pequena.

patogênicos e da radiação infravermelha no aumento da temperatura do efluente por intermédio da conversão da energia associada à radiação em calor (GONÇALVES, 2003).

A desinfecção solar por radiação UV baseia-se em alterações do material genético (DNA, RNA) dos patógenos presentes na ARD devido a absorção de fótons. Fóton ou *quantum* são pequenos pacotes de energia que podem ser absorvidos ou emitidos por moléculas e átomos. A energia concentrada em um fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação emitida. Ao ser absorvido, sua energia é transferida para tal molécula ou átomo (BARROSO; WOLFF, 2009). A absorção de um fóton por uma molécula pode promover fotólise, que é a dissociação de moléculas complexas por meio da energia dos fótons (GONÇALVES, 2003).

Segundo Gonçalves (2003), o DNA (ácido desoxirribonucleico) é constituído por uma sequência de quatro bases nitrogenadas (adenina, citosina, guanina e timina) que configuram o código genético dos organismos vivos. Essas bases são ligadas por pontes de hidrogênio e ficam emparelhadas em pares. As pontes de hidrogênio mantêm as duas fitas de DNA conectadas (estrutura conhecida como dupla hélice). As moléculas de DNA dos organismos absorvem os fótons que em determinada “dose” deformam sua estrutura helicoidal dificultando sua transcrição e replicação. Caso a duplicação ocorra as novas células descendentes serão incapazes de se multiplicar. A Figura 6 apresenta a representação gráfica do processo de inativação de patógenos pela radiação ultravioleta.

Figura 6- Processo de inativação de microrganismos por radiação solar UV



Fonte: Adaptado de Aqua lighttech limited (2019)

Todavia, após a ação da radiação UV sobre as moléculas de DNA os danos causados podem ser reparados em um processo chamado de *fotorreativação* quando ocorre na presença de luz ou *recuperação no escuro* quando ocorre na ausência de luz. Assim, para que o processo de desinfecção seja eficaz é necessário fornecer uma alta “dose” de fótons a fim de garantir que as moléculas de DNA sejam danificadas sem possibilidade de reparo (LECHEVALLIER; AU, 2004).

A “dose letal” depende da intensidade da radiação e do tempo de exposição. Ela pode ser definida como a intensidade da radiação solar multiplicada pelo tempo de exposição, sendo normalmente expressa em kJ m^{-2} ou MJ m^{-2} . A intensidade da radiação será principalmente a irradiância numa dada direção por unidade de ângulo sólido, geralmente expressa em W. sr^{-1} (IQBAL, 1983).

No estudo desenvolvido por Kowalski et al. (2000) foi encontrada uma correlação positiva entre a intensidade da radiação e a inativação de esporos da espécie de fungo *Aspergillus niger* presentes no ar. A constante de inativação se tornou maior quando os esporos foram irradiados com radiação crescente (acúmulo da radiação). De acordo com o modelo desenvolvido, a inativação efetiva não ocorrerá até que a chamada “dose letal” seja alcançada, sendo refletida quando o processo de inativação é plotado em um gráfico da fração remanescente do microrganismo versus a dose acumulada de radiação (energia).

A eficácia da desinfecção solar para o tratamento da água foi investigada para diversos organismos patogênicos (bactérias, vírus, protozoários, helmintos). O Quadro 4 apresenta a redução logarítmica relatada na literatura científica para diferentes tipos de patógenos.

Quadro 4- Redução logarítmica de microrganismos patogênicos por desinfecção solar

Patógeno	log de redução (*6 h)	Referência
<i>Escherichia Coli</i>	2-5	Boyle et al. (2008)
<i>Vibrio cholera</i>	3-5	Berney et al. (2006)
<i>Salmonella spp.</i>	2-4	Bosshard et al. (2009)
<i>Echovirus</i>	1	Fujioka & Yoneyama 2002)
<i>Giardia spp</i>	2 - >3	McGuigan et al. (2006)
<i>Ascaris Suum</i>	1	Heaselgrave e Kilvington (2011)

Fonte: Adaptado de Sandec (2016) *Redução logarítmica em até 6 horas de exposição solar; Estimativas para doses de radiação UV de aproximadamente 1 MJ m^{-2} .

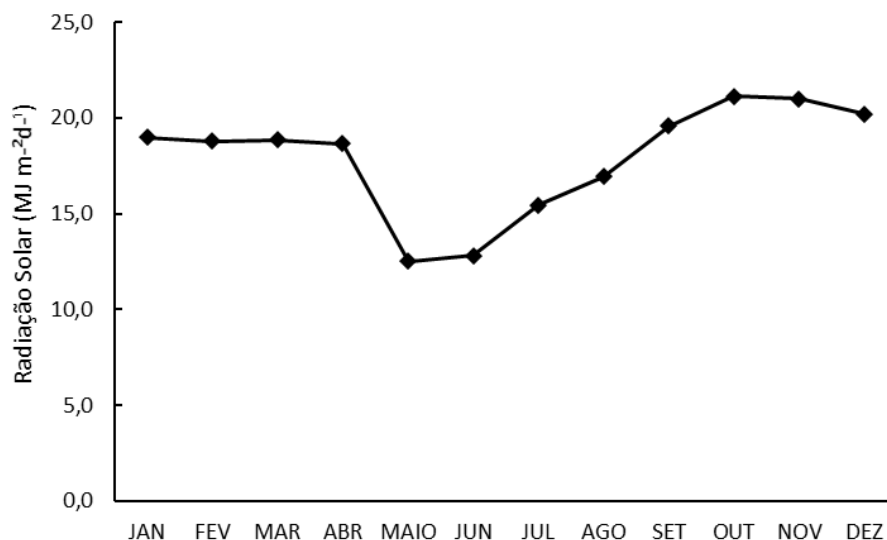
Wegelin et al. (1994) realizaram a comparação da dose de radiação solar requerida na inativação de diferentes microrganismos patogênicos: bactérias (*E. coli*, *Streptococcus faecalis* e *Enterococcus sp.*) e vírus (bacteriófago f2, *Encephalomyocarditis virus*-EMCV e rotavírus bovino estirpe UK). Na análise do processo de inativação destes microrganismos por radiação solar, foi observado que para águas com temperatura variando de 20°C a 40°C, a dose de radiação requerida para atingir a inativação de 3 log de redução da bactéria *E. coli* é de aproximadamente 2.000 kJ m⁻² (2 MJ m⁻²). Esta mesma quantidade de radiação reduziu a uma similar ordem de magnitude os microrganismos bacteriófago f2 e rotavírus bovino estirpe UK. Já o EMCV, em contraste, foi mais resistente que os demais microrganismos estudados. Dessa forma, os autores apontaram que a bactéria *E. coli* pode ser utilizada como organismo indicador para monitorar a eficiência da desinfecção solar da água em relação a inativação de bactérias e vírus.

2.6.2.2 Fatores que podem afetar o processo de desinfecção solar

A eficiência do processo de desinfecção solar pode ser afetada pelas mudanças na incidência de radiação ao longo das estações do ano (primavera, verão, outono, inverno). Estas alterações podem ocorrer devido a mudanças no ângulo zenital solar (Z), pois quanto maior Z menor a irradiância solar. Como também, devido a cobertura de nuvens, que pode ser maior em estações chuvosas, influenciando o processo de absorção e espalhamento da luz solar que incide sobre a Terra (ACRA; RAFFOUL; KARAHAGOPIAN, 1984).

Na Figura 7 é possível perceber como a radiação solar pode variar ao longo do ano. O gráfico representa a variação da radiação solar diária média mensal para Botucatu-SP com base em dados obtidos no ano de 2016. Os meses que apresentaram maior radiação solar global diária foram outubro e novembro \cong 21 MJ m⁻² d⁻¹ (Estações climáticas primavera e verão), enquanto que, os menores valores foram encontrados para os meses de maio e junho \cong 12 MJ m⁻² d⁻¹ (Estações climáticas outono e inverno).

Figura 7- Variação diária média da radiação solar por mês durante o ano de 2016 para Botucatu-SP



Fonte: Estação Meteorológica Lageado (2019)

Sommer et al. (1997) analisaram o efeito da cobertura de nuvens na disponibilidade da radiação solar. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para radiação solar diária disponível em diferentes situações de cobertura de nuvens.

Tabela 5- Radiação solar disponível em diferentes situações de cobertura de nuvens

Condição	Radiação solar UV-A (%)
Céu aberto (sem nuvens)	100
Céu com poucas nuvens	100
50% do céu coberto por nuvens	64
Bastante nublado	53
Completamente nublado	37

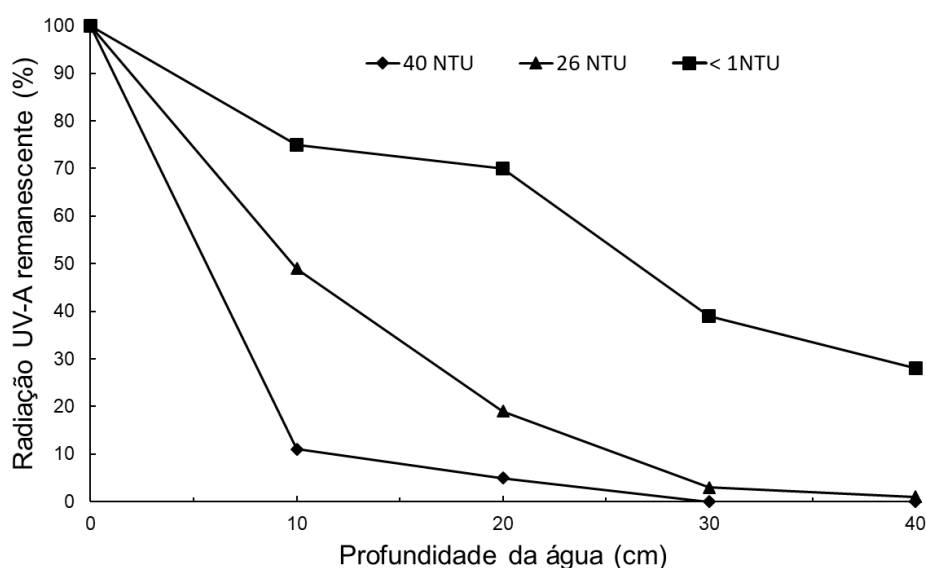
Fonte: Sommer et al. (1997, p. 136)

A temperatura também é um fator que pode afetar a desinfecção solar da ARD. A eficácia do processo pode aumentar significativamente com altas temperaturas. Wegelin et al. (1994) observaram efeitos sinérgicos entre o aumento da temperatura e a inativação bacteriana, se a água apresentar temperatura igual à 50°C, a dose de radiação solar requerida e/ou o tempo de exposição solar poderá ter uma redução de 2/3 (67%). Já para águas que apresentem temperatura variando de 20 a 40°C, a inativação bacteriana não deve ser afetada pelo aumento da temperatura sendo a dose de radiação solar o principal fator responsável pelo processo de desinfecção.

As partículas suspensas na água absorvem e dispersam a radiação na faixa visível e UV e podem, assim, reduzir a eficácia do processo de desinfecção. Também, pode ocorrer agregação ou oclusão dos microrganismos na matéria particulada impedindo a penetração da radiação. No trabalho desenvolvido por Queluz (2013), os resultados encontrados indicaram que dependendo da concentração de sólidos suspensos totais na ARD, o tempo de exposição à radiação solar necessário para desinfetá-la a níveis adequados para o reúso agrícola pode ser superior a três dias.

De acordo com o Departamento de Água e Saneamento para Países em Desenvolvimento- Sandec (2002), o processo de desinfecção solar também é influenciado pelo nível de turbidez e a profundidade da água a ser tratada. Conforme a profundidade aumenta, a penetração da radiação UV é reduzida, enquanto que, quanto maior a turbidez maior a dificuldade de um feixe de luz atravessar a ARD. Sommer et al. (1997), observaram a penetração da radiação UV-A em lâminas de água de 10, 20, 30 e 40 cm de profundidade que apresentavam diferentes níveis de turbidez. Foi constatado que a radiação UV-A varia conforme a profundidade da água e seu nível de turbidez (Figura 8). Por este motivo, Sandec (2002) recomenda que para uma desinfecção eficaz a água a ser tratada deverá apresentar turbidez ≤ 30 NTU, caso o nível de turbidez seja superior a 30 NTU, deverá ser adotado métodos de tratamento como filtração, decantação ou floculação antes da exposição à luz solar.

Figura 8- Representação da relação entre nível de turbidez e a profundidade da água no processo de atenuação da radiação UV-A



Fonte: Adaptado de Sommer et al. (1997)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características do local de realização do experimento

O sistema de tratamento foi instalado na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas-FCA, Unesp, Botucatu-SP, coordenadas geográficas: 22°51'9.74"S; 48°25'49.57"O e altitude de 782 m acima do nível do mar (Figura 9).

Figura 9- Fotografia aérea da localização do sistema de tratamento



Fonte: Foto tirada dia 09/04/2017 por Roberta Daniela da Silva Santos com Drone DJI.

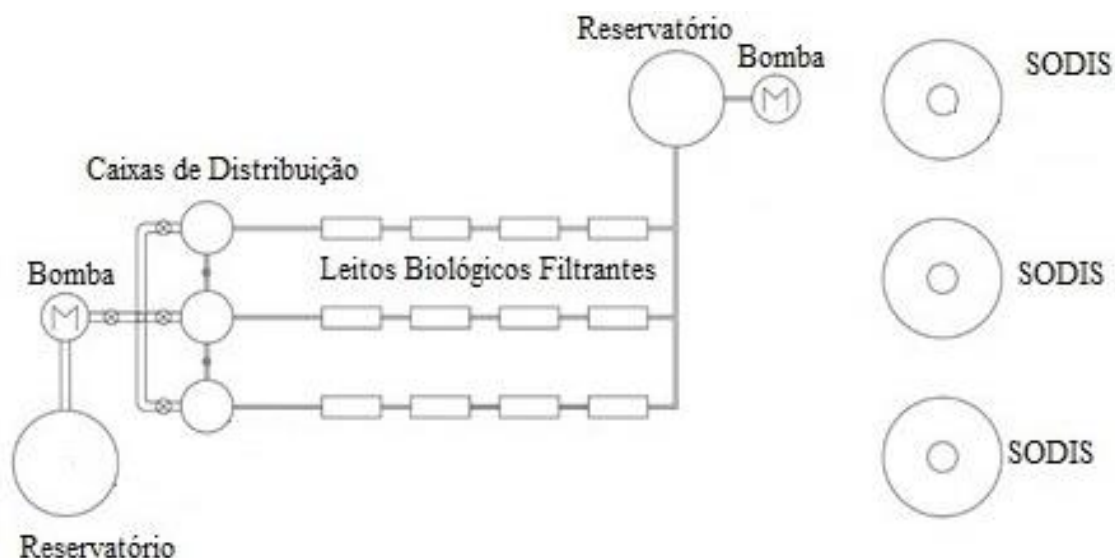
Segundo a classificação climática realizada por Cunha e Martins (2009), o município de Botucatu pode ser caracterizado pelo método de Köppen como sendo Cfa, clima temperado quente (mesotérmico) úmido que apresenta temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C.

3.2 Características do sistema de tratamento

O efluente secundário era transportado por trator acoplado a um tanque pipa da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Botucatu-ETE Lageado até a área experimental. Esse efluente era armazenado em um reservatório de 1.000 L, posteriormente, era bombeado para três caixas de distribuição de 150 L que distribuíam a água residuária nos três leitos biológicos filtrantes-LBF's instalados em paralelo e ligados à um reservatório de 2.000 L que armazenava o efluente tratado. Uma bomba centrífuga direcionava o efluente proveniente dos LBF's para os três reatores de desinfecção solar -SODIS de coloração preta, nos quais as lâminas de ARD de 10, 15 e 20 cm foram testadas (Figura 10). De acordo com Oliveira (2012), a

ETE-Lageado apresenta sistema misto de tratamento, composto por: equalização, reator anaeróbico de fluxo ascendente- UASB e lodos ativados. A estação é responsável pelo tratamento de esgoto da área urbana do município de Botucatu-SP, sendo os esgotos afluentes predominantemente esgotos domésticos, com pouca contribuição de despejos líquidos industriais.

Figura 10- Layout do sistema experimental de tratamento de água residuária doméstica

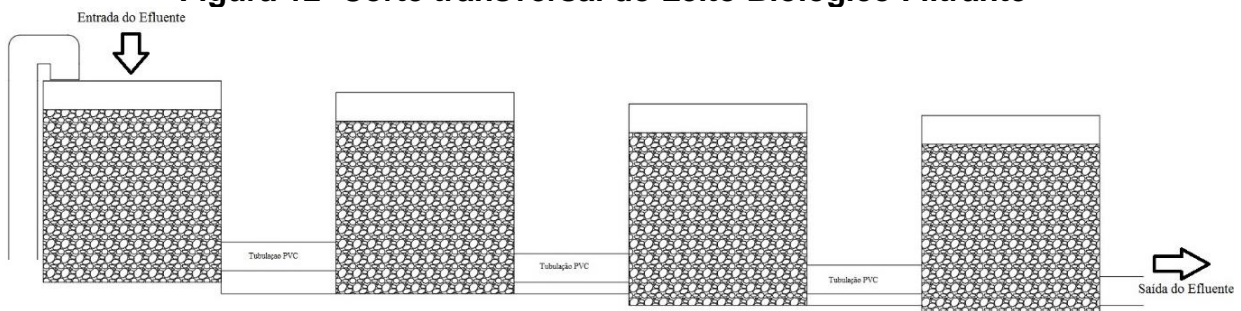


Cada leito biológico filtrante-LBF consistia de quatro caixas d'água retangulares (fibra de vidro) com dimensões de 100 x 35 x 31 cm, ligadas em série por tubulação de PVC de 50 mm com meio suporte brita #0 (granulometria de 4,8 mm a 9,5 mm) saturado a uma altura de 30 cm (Figura 12). Em cada caixa d'água foram colocadas bases de madeirite a fim de promover um desnível entre elas para que o escoamento do efluente ocorresse por gravidade. A primeira caixa ficou a 6 cm do solo, a segunda à 4 cm, a terceira a 2 cm e última no nível do solo (Figura 11). O volume de vazios do material suporte brita #0 foi estimado utilizando água destilada e uma proveta graduada segundo Brasil e Matos (2008), sendo obtido valor médio de 65% de porosidade. Cada LBF apresenta volume útil de aproximadamente 0,16 m³ (160 L). Durante o período de pesquisa a vazão média do efluente secundário liberado no LBF foi de 0,15 m³ d⁻¹. O tempo de detenção hidráulica calculado através da Equação 1 foi de aproximadamente 1,06 dia.

Figura 11- Características do Leito Biológico Filtrante



Figura 12- Corte transversal do Leito Biológico Filtrante



$$td = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Em que, td -Tempo de detenção hidráulica (d); V - volume do leito biológico filtrante (m^3) e Q - vazão média diária ($m^3 d^{-1}$).

Os três reatores de desinfecção solar-SODIS (Figura 13) apresentam uma base de concreto e formato de tronco cônico invertido e dimensões de raio maior, raio menor e altura de 1,00 metros, 0,25 metros e 0,30 metros, respectivamente (QUELUZ; SÁNCHEZ-ROMÁN, 2014). Essas dimensões implicam em um ângulo de inclinação de $21,8^\circ$, valor equivalente a latitude de Botucatu ($22^\circ S$). Nos SODIS foram testadas lâminas de ARD iguais a 10, 15 e 20 cm (Figura 14) para verificar qual delas seria mais eficiente na inativação de coliformes fecais (*E. coli*). As três lâminas ficaram expostas à radiação solar por um período de 10 horas (das 08:00 às 18:00 horas).

Figura 13- Design do reator de desinfecção solar

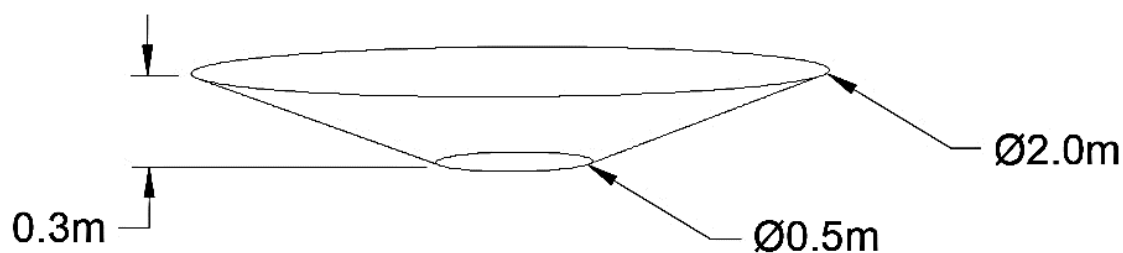
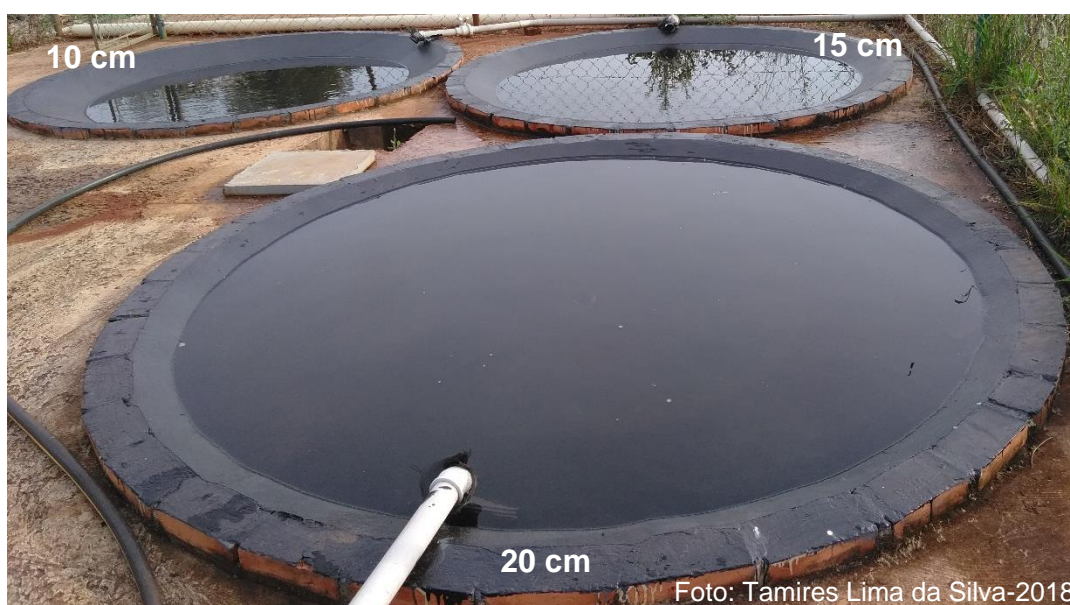


Figura 14- Lâminas de ARD testadas nos reatores de desinfecção solar-SODIS



3.3 Coleta e análise das amostras

Para avaliar a influência das variações na radiação solar global ao longo das estações do ano na eficiência do processo de desinfecção solar, o comportamento do sistema experimental foi monitorado em dois períodos: de maio a julho de 2018 (período outono-inverno), e de dezembro de 2018 a março de 2019 (período primavera-verão). Foram conduzidas 12 coletas (seis no período outono-inverno e seis no período primavera-verão). As datas das coletas são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5- Datas das coletas de amostras de água residuária doméstica em cada etapa do experimento

Etapa	Data da coleta	Etapa	Data da coleta
1ª Etapa (maio a julho de 2018)	07/05/2018	2ª Etapa (dezembro de 2018 a março de 2019)	19/12/2018
	14/05/2018		25/01/2019
	28/05/2018		04/02/2019
	04/06/2018		13/02/2019
	18/06/2018		14/03/2019
	04/07/2018		20/03/2019

Para avaliar o comportamento do processo de inativação da *E. coli* em resposta a dose de radiação acumulada no SODIS, eram retiradas duas alíquotas de ARD: a primeira para análise da população de *E. coli* e a segunda para análise de pH e demanda química de oxigênio (DQO). A cada dia de coleta, a retirada das alíquotas ocorria a cada duas horas durante o período de dez horas de exposição solar ao qual cada lâmina foi submetida (08:00 às 18:00h). Assim, a primeira retirada das alíquotas de ARD era realizada às 08:00h (0h de exposição solar), a segunda às 10:00h (2h de exposição solar), a terceira às 12:00h (4h de exposição solar), a quarta às 14:00h (6h de exposição solar), a quinta às 16:00 h (8h de exposição solar) e a sexta às 18:00h (10h de exposição solar).

Todas as alíquotas para a análise de *E. coli*, DQO e pH foram coletadas e preservadas conforme Standard Methods 1060 B e 1060 C, respectivamente. Foram utilizados sacos plásticos estéreis de 100 ml com tiosulfato (marca: Nasco Whirl-Pak) na coleta de ARD para análise de *E. coli* e garrafas plásticas de 300 mL na coleta para análise de DQO e pH. As análises das alíquotas retiradas foram realizadas no laboratório de Recursos Hídricos e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas – Unesp campus Botucatu, conforme a 22ª edição do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

Nas três últimas coletas do período primavera-verão (13/02/2019; 14/03/2019 e 20/03/2019) foram realizadas análises de reativação bacteriana. As alíquotas de ARD nas lâminas de 10, 15 e 20 cm foram retiradas às 18:00 h (tempo de exposição = 10h). Foram utilizados frascos de vidro âmbar previamente esterilizados com

capacidade de 250 mL. As amostras foram armazenadas em estufa microbiológica à 37°C. Após 48 e 72 horas de armazenamento foram retiradas alíquotas para análise de coliforme fecais (*E. coli*). As análises foram realizadas no laboratório de Recursos Hídricos e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas – Unesp campus Botucatu conforme método 9223B (APHA, 2012).

Foram conduzidas análises para o parâmetro de qualidade microbiológica da ARD ovos de helmintos. Foram realizadas coletas de amostras de ARD em todos os reatores SODIS (10, 15 e 20 cm) após seis horas de exposição solar. Os procedimentos para coleta e análise laboratoriais seguiram as recomendações propostas por Ayres e Mara (1996).

A temperatura foi outro parâmetro monitorado a cada duas horas durante o período de dez horas de exposição das lâminas de 10, 15 e 20 cm à radiação solar. Para medir o valor da temperatura nos SODIS foi utilizado termômetro modelo LCD Thermometer with Probe conforme Figura 15.

Figura 15- Medição da temperatura no SODIS



Foto: Tamires Lima da Silva-2018

A eficiência dos LBF's foi observada através da coleta e análise de amostras de ARD na entrada (afluente) e saída (efluente), os seguintes parâmetros foram monitorados: DBO, DQO, SST, sólidos totais (ST), sólidos dissolvidos totais (SDT), turbidez, pH, nitrogênio total (N), fósforo (P), potássio (K), condutividade elétrica (CE), coliformes totais, *Escherichia coli* (*E. coli*) e ovos de helmintos.

O parâmetro turbidez foi avaliado no laboratório de Química do Instituto de Biociências-IBB, Unesp Botucatu com uso do equipamento turbidímetro modelo 2100P, fabricante Hach. As análises para ovos de helmintos foram conduzidas no laboratório de Parasitologia do Instituto de Biociências- IBB, Unesp Botucatu conforme metodologia recomendada pela Organização Mundial de Saúde-OMS. Os demais parâmetros foram avaliados no laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas - Unesp Botucatu. O Quadro 6 apresenta as metodologias adotadas para análise dos parâmetros monitorados, exceto para análise de ovos de helmintos.

Quadro 6- Parâmetros de qualidade da água residuária doméstica analisados e metodologias adotadas

Parâmetro	Método	Referência ¹
DBO (mg L ⁻¹)	Respirometric Method	5210D
DQO (mg L ⁻¹)	Closed Reflux, Colorimetric	5220D
Coliformes Totais (NMP100 mL ⁻¹)	Enzyme Substrate Test with Multi-well procedure	9223B
<i>E. coli</i> (NMP100 mL ⁻¹)	Enzyme Substrate Test with Multi-well procedure	9223B
pH	Eletrometric Method	4500B
CE (µS/cm)	Laboratory Method	2510B
SST (mg L ⁻¹)	Total Solids Dried at 103-105°C	2540D
ST (mg L ⁻¹)	Total Suspended Solids Dried at 103-105°C	2540B
SDT (mg L ⁻¹)	ST-SST	-----
Turbidez (NTU)	Nephelometric Method	2130B
N (mg L ⁻¹ de N)	Persulfate Digestion Method	4500C
P (mg L ⁻¹ PO ₄ ³⁻)	Persulfate Method	4500-P E
K (mg L ⁻¹ de K)	Potassium Permanganate spectrophotometric Method	4500B

Fonte: APHA (2012); ¹ Todas as referências são provenientes da 22ª edição do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater; DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; CE- Condutividade Elétrica; SST – Sólidos Suspensos Totais; ST- Sólidos Totais; N- Nitrogênio; P- Fósforo; K- Potássio.

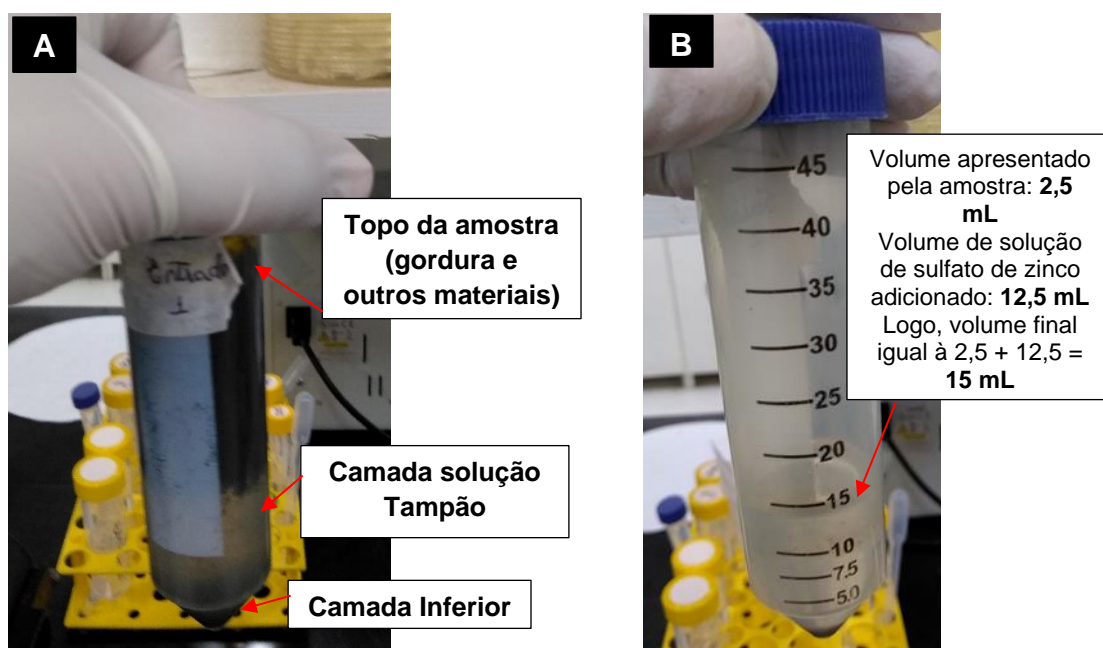
O Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012) não dispõe de metodologia para identificação e quantificação de ovos de helmintos, por este motivo, foi adotado o método de Bailenger modificado por Ayres e Mara (1996) que é recomendado pela OMS. A coleta e análise das amostras de ARD foram realizadas conforme as seguintes orientações:

- a) Coletar um volume conhecido do efluente, para efluentes que tenham sido submetidos a tratamento prévio em estações de tratamento de esgoto recomenda-se a coleta de pelo menos 10 litros: Foram coletados o volume de 20 L de ARD. As coletas foram realizadas para: entrada do LBF, saída do LBF, SODIS com as lâminas de 10, 15 e 20 cm após 6 horas de exposição à radiação solar.
- b) Permitir a sedimentação da amostra por 1 ou 2 horas: Foi estabelecido um período de sedimentação de 2 horas para todas as amostras;
- c) Remover 90% do sobrenadante usando uma bomba de sucção ou sifão: O sobrenadante foi removido com uso do sifão, o volume restante foi colocado em um béquer de 1L e deixado para sedimentar “*overnight*” (de um dia para outro). Após este período o sobrenadante foi removido do béquer acima da camada sedimentada e o béquer foi enxaguado com solução detergente (1 mL de Triton X-100 em 1 L de água deionizada). A finalidade do enxague com solução detergente foi a obtenção total do material sedimentado;
- d) Transferir a camada sedimentada e o volume proveniente do enxague com solução detergente para 1 ou mais tubos de centrífuga e centrifugar os tubos a 1.000g por 15 minutos: O material sedimentado e o volume proveniente do enxague foram transferidos para tubos falcon de 50 mL e após o ajuste de peso, os tubos foram levados para centrifugação por 15 minutos a 1.000g.
- e) Retirar o sobrenadante, e se mais de um tubo for usado por amostra transferi-la para um único tubo: O sobrenadante foi retirado com um único movimento firme e rápido. Depois, cada amostra foi transferida para um único tubo e o material sedimentado dos tubos sobressalentes foram enxaguados com solução detergente para que nenhum sedimento fosse descartado. As amostras foram novamente centrifugadas a 1000g por 15 minutos. Após a centrifugação o sobrenadante presente nos tubos foi descartado.

- f) Suspender o material sedimentado em solução tampão acetoacético (Preparo feito com ± 15 g de acetato de sódio tri-hidratado e $\pm 3,6$ mL de ácido acético glacial, diluídos em 1 L de água deionizada) com pH igual a 4,5.⁸ O volume da solução deverá ser equivalente ao volume do sedimento: Seguiu-se a recomendação para todas as amostras.
- g) Adicionar dois volumes de acetato de etilo em relação ao volume do material sedimentado, e agitar as amostras em um agitador vortex ou manualmente: Seguiu-se a recomendação para todas as amostras sendo a homogeneização dos tubos feita manualmente (agitação com as mãos).
- h) Centrifugar as amostras a 1.000 g por 15 minutos: Seguiu-se a recomendação para todas as amostras e observou-se que após o processo de centrifugação houve a separação das amostras em três camadas distintas conforme Figura 16a. De acordo Ayres e Mara (1996), todos os detritos não gordurosos, mais pesados, incluindo ovos de helmintos, larvas e protozoários, estarão na camada inferior. Acima dela, estará a solução tampão, que deve estar clara. Gorduras e outros materiais se movem para o acetato de etilo e formam uma espessa camada escura no topo da amostra (Figura 16a).
- i) Registrar o volume da camada inferior (que pode conter ovos de helmintos) e, em seguida, despejar o restante do sobrenadante com movimento firme e cuidadoso: Seguiu-se a recomendação para todas as amostras.
- j) Ressuspender o sedimento em cinco volumes de solução de sulfato de zinco de densidade igual a $1,18 \text{ g mL}^{-1}$ (5 vezes o volume da registrado da amostra) e agitar bem para uma boa homogeneização: Seguiu-se a recomendação para todas as amostras (Figura 16b).
- k) Remover rapidamente uma alíquota com uma pipeta pasteur, transferi-la para uma Câmara McMaster e deixa-la em repouso em superfície plana por cinco minutos (tempo recomendado para que ovos de helmintos flutuem na superfície da câmara). Em seguida, levar a câmara ao microscópio e examiná-las com uma ampliação de 10x ou 40x: Seguiu-se esta orientação para todas as amostras.

⁸ Se o volume do material sedimentado for inferior a 2 ml, adicionar tampão até 4 ml.

Figura 16- Análise de ovos de helmintos na água residuária doméstica



3.4 Determinação da radiação solar global

Os dados para radiação solar global foram obtidos na Estação Meteorológica Lageado (coordenadas geográficas 22°50'48,14"S; 48°25'53,52"O), que está localizada a aproximadamente 700 metros dos reatores de desinfecção solar-SODIS. Na estação automática, os dados de radiação solar são medidos a cada 5 segundos, em seguida, estes valores são processados e uma média é registrada a cada 5 minutos, gerando assim valores confiáveis (ESTAÇÃO METEOROLOGICA LAGEADO, 2019). O equipamento utilizado na estação para medir a radiação solar é o piranômetro modelo CMP3, fabricante Kipp e Zonen. O Quadro 7 apresenta as principais características do equipamento.

Quadro 7- Características do piranômetro modelo CMP3

Faixa espectral	300 a 2800nm
Unidade de medida	W/m ²
Tempo de resposta	18 segundos
Campo de visão	180°
Faixa de temperatura operacional	-40 a +80°C
Sensibilidade	5 a 20µV/W/m ²

Fonte: Kipp & Zonen B.V (2019)

3.6 Análise dos resultados

A avaliação da eficiência dos reatores de desinfecção solar-SODIS na inativação de coliformes fecais (*E. coli*) em cada lâmina (10, 15 e 20 cm) foi determinada pela observação das seguintes variáveis: temperatura (°C), dose de radiação global acumulada (MJ m⁻²), demanda química de oxigênio-DQO (mg L⁻¹) e pH.

Os dados foram avaliados através do teste estatístico de análise de variância-ANOVA. Para comparar a eficiência das lâminas aplicadas e as repetições do experimento a variável resposta utilizada foi a razão da população de *E. coli* inicial (No) e a população de *E. coli* remanescente (N) após exposição à radiação solar.

A ferramenta Geeraerd e Van Impe (GInaFIT) (GEERAERD; VALDRAMIDIS; VAN IMPE, 2005) disponível no software Excel foi utilizada para gerar a curva de inativação das bactérias *E. coli*, que relaciona a população de *E. coli* em log (logarítmico) com o tempo de exposição solar.

No software estatístico Statgraphics através da análise de regressão não linear foram desenvolvidos modelos matemáticos que representam a população remanescente de coliformes fecais (*E. coli*) em águas residuárias domésticas após serem expostas à radiação solar global. Com base nos resultados obtidos por Sánchez-Román et al. (2007) e Queluz e Sánchez-Román (2014) a função utilizada para analisar os dados e ajustar os modelos foi uma função sigmóide (*S-shape function*), conforme equação 2:

$$y = \frac{e^{(a+b_0x_0+b_1x_1+\dots+b_nx_n)}}{(1+e^{(a+b_0x_0+b_1x_1+\dots+b_nx_n)})} \quad (2)$$

As taxas de aplicação superficial da carga orgânica nos LBF's foram calculadas pela equação 3.

$$TAS = \frac{Carga}{A} \quad (3)$$

Em que, *TAS* = Taxa de aplicação superficial (g m² d⁻¹); *carga*= concentração do parâmetro multiplicada pela vazão aplicada (g d⁻¹); *A*= área superficial dos LBF's(m²)

A eficiência dos LBF's na redução da concentração de SST, ST, nível de turbidez, DQO e DBO foi calculada, conforme equação 4:

$$E = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (4)$$

Em que, E= Eficiência de remoção (%); C₁= Concentração da entrada dos LBF's (afluente); C₂= Concentração na saída dos LBF's (efluente).

A viabilidade para reúso agrícola foi determinada através da observação das seguintes diretrizes:

- a) observação do guia para interpretação da qualidade da água para irrigação proposto pela FAO (AYRES; WESTCOT, 1985);
- b) análise de risco de entupimento de gotejadores conforme classificação proposta por Bucks, Nakayama e Gilbert (1979);
- c) orientação da OMS (WHO, 2006) para os parâmetros coliformes fecais (≤ 1.000 NMP 100 mL⁻¹) e ovos de helmintos (≤ 1 N^o de ovos por litro).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características da água residuária doméstica afluente dos Leitos

Biológicos Filtrantes

A Tabela 6 mostra as características físico-químicas e microbiológicas da ARD afluente dos LBF's (entrada dos LBF's) proveniente da Estação Tratamento de Esgoto da cidade de Botucatu-ETE Lageado.

Tabela 6- Características da água residuária doméstica na entrada (afluente) dos Leitos Biológicos Filtrantes

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
DBO (mg L ⁻¹)	56,33	92,0	40,0	15,5	27,5
DQO (mg L ⁻¹)	360,8	792,0	158,3	260,6	72,2
CT (NMP 100 mL ⁻¹)	1,76 x 10 ⁸	1,01 x 10 ⁹	7,90 X 10 ⁵	3,86 x 10 ⁸	219,3
<i>E. coli</i> (NMP 100 mL ⁻¹)	1,07 x 10 ⁷	1,03 x 10 ⁸	3,10 x 10 ⁴	2,94 x 10 ⁷	274,7
pH	7,8	8,20	7,56	0,2	2,7
CE (µS/cm)	672,9	1.236,0	376,0	215,2	31,9
SST (mg L ⁻¹)	397,0	1.278,0	135,0	372,0	93,7
ST (mg L ⁻¹)	824,0	1.943,0	402,0	433,0	52,5
SDT (mg L ⁻¹)	427,3	918,0	189,0	194,9	45,6
Turbidez (NTU)	210,5	459,0	70,1	129,6	61,5
N (mg L ⁻¹ de N)	73,2	164,8	44,1	38,3	52,3
P (mg L ⁻¹ de PO ₄ ³⁻)	11,0	12,81	8,44	1,3	12,0
K (mg L ⁻¹ de K)	31,5	43,4	17,1	8,5	26,9
Ovos de Helmintos (ovos L ⁻¹)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	-	-

C.V- Coeficiente de Variação; DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; CT- Coliformes Totais; CE- Condutividade Elétrica; SST – Sólidos Suspensos Totais; ST- Sólidos Totais; SDT- Sólidos Dissolvidos Totais; N- Nitrogênio total; P- Fósforo total; K- Potássio.

O valor médio encontrado para *E. coli* de 1,07 x 10⁷ NMP 100 mL⁻¹, evidencia o risco de contaminação microbiológica do solo e culturas irrigadas pelo uso de ARD sem tratamento específico para desinfecção. Não foram detectados ovos de helmintos na ARD proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes- ETE Lageado. Este resultado corrobora com os estudos desenvolvidos por Gomes (2016) e Bressan (2015) que também não encontraram ovos de helmintos nas análises feitas para o

efluente advindo da ETE Lageado. Ayres et al. (1991) explica que o número de ovos de helmintos presentes em efluentes tratados em ETE é normalmente muito baixo na faixa de 4 a 6 ovos L⁻¹, entretanto, a concentração deste microrganismo patogênico pode variar de acordo com a região de estudo, devido as condições sanitárias e socioeconômicas da população local (HANJRA et al., 2012).

4.2 Características da água residuária doméstica efluente dos Leitos

Biológicos Filtrantes

A ARD após passar pelos três LBF's era armazenada em um reservatório de 2.000 L, as coletas para análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da ARD foram realizadas neste reservatório, caracterizando-se assim uma amostra composta. A Tabela 7 apresenta as características físico-químicas e microbiológicas da ARD efluente (saída) dos LBF's.

Tabela 7- Características da água residuária doméstica na saída (efluente) dos Leitos Biológicos Filtrantes

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
DBO (mg L ⁻¹)	25,6	39,0	17,0	7,0	27,3
DQO (mg L ⁻¹)	35,7	56,0	24,0	9,7	27,2
CT (NMP 100 mL ⁻¹)	3,50 x 10 ⁵	1,38 x 10 ⁶	2,93 x 10 ³	4,61 x 10 ⁵	131,7
<i>E. coli</i> (NMP 100 mL ⁻¹)	4,4 x 10 ⁴	1,61 x 10 ⁵	1,60 x 10 ²	6,04 x 10 ⁴	137,3
pH	7,6	8,0	7,3	0,2	2,6
CE (µS/cm)	499,1	644,3	273,6	131,7	26,4
SST (mg L ⁻¹)	10,68	26,00	4,33	6,14	57,4
ST (mg L ⁻¹)	395,3	783,0	291,0	133,6	33,7
SDT (mg L ⁻¹)	384,6	773,0	277,5	134,0	34,8
Turbidez (NTU)	4,9	14,0	0,8	4,6	93,8
N (mg L ⁻¹ de N)	17,0	30,5	3,0	11,0	64,7
P (mg L ⁻¹ de PO ₄ ³⁻)	5,2	9,4	2,3	2,6	50,0
K (mg L ⁻¹ de K)	16,0	22,7	5,6	5,4	33,7

C.V- Coeficiente de Variação; DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; CT- Coliformes Totais; CE- Condutividade Elétrica; SST – Sólidos Suspensos Totais; ST- Sólidos Totais; SDT- Sólidos Dissolvidos Totais; N- Nitrogênio total; P- Fósforo total; K- Potássio.

4.3 Viabilidade do reúso agrícola da água residuária doméstica tratada nos Leitos Biológicos Filtrantes

As diretrizes da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura-FAO (AYRES e WESTCOT, 1985) para interpretação da qualidade da água para irrigação, dispõe que análises de qualidade da água que apresentem valores $< 700 \mu\text{S/cm}$ para o parâmetro CE, $\text{SDT} < 450 \text{ mg L}^{-1}$ e pH na faixa de 6,5-8,4 podem ser classificadas como sem restrição de uso para irrigação. Os resultados médios obtidos, apresentados na Tabela 8 para o efluente na saída dos LBF's durante o período de estudo foram: 499,1 $\mu\text{S/cm}$, 384,6 mg L^{-1} e 7,6 para CE, SDT e pH, respectivamente. Portanto, a ARD tratada nos LBF's se enquadra na condição de qualidade de "não restrição" para reúso na agricultura irrigada podendo ser adotado qualquer método de irrigação (superfície, aspersão ou localizada).

Tabela 8- Qualidade da água residuária doméstica tratada nos LBF's para reúso na irrigação

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
CE ($\mu\text{S/cm}$)	499,1	644,3	273,6	131,7	26,4
SDT (mg L^{-1})	384,6	773,0	277,5	134,0	34,8
pH	7,6	8,0	7,3	0,2	2,6
SST (mg L^{-1})	10,68	26,00	4,33	6,14	57,4
<i>E. coli</i> (NMP 100 mL^{-1})	$4,4 \times 10^4$	$1,61 \times 10^5$	$1,60 \times 10^2$	$6,04 \times 10^4$	137,3
Ovos de Helminthos (ovos L^{-1})	≤ 1	-	-	-	-

C.V- Coeficiente de Variação; CE- Condutividade Elétrica; SDT- Sólidos Dissolvidos Totais; SST – Sólidos Suspensos Totais

De acordo com Oliveira (2012) o método de irrigação localizada por gotejamento é suscetível ao entupimento dos emissores, principalmente quando se utiliza água residuária. Dessa forma, caso o método de irrigação adotado por comunidades rurais e populações tradicionais seja o método de irrigação localizada por gotejamento será necessário observar o risco de entupimento dos emissores. Na classificação proposta por Bucks, Nakayama e Gilbert (1979), o risco de entupimento dos emissores pode ser considerado baixo, moderado ou severo. Segundo esta classificação, os valores médios obtidos para os parâmetros CE (499,1 $\mu\text{S/cm}$), SDT (384,6 mg L^{-1}) e SST (10,68 mg L^{-1}) (Tabela 8) classificam a ARD tratada nos LBF's

com risco baixo de entupimento de gotejadores, já o valor médio de pH encontrado (pH=7,6) indica um risco de entupimento moderado. Logo, a ARD tratada nos LBF's apresenta risco baixo a moderado de entupimento de gotejadores.

Irrigação de culturas que são consumidas cruas ou que são cultivadas nas camadas superficiais do solo (tubérculos, rizomas, bulbos e raízes tuberosas) com ARD representam riscos à saúde pública devendo ser observados parâmetros da qualidade microbiológica da ARD tratada. O padrão de qualidade microbiológica estabelecido pela OMS (WHO, 2006), é fundamentado em evidências epidemiológicas, avaliações de risco e na Avaliação Qualitativa de Risco Microbiológico- AQRM (BRAGA; LIMA, 2014) que determinam os valores de “risco tolerável”. A ARD tratada nos LBF's apresentou valor médio de coliformes fecais (*E. coli*) igual à $4,4 \times 10^4$ NMP 100 mL⁻¹ (Tabela 8). Este valor está acima do valor recomendado pela OMS (WHO, 2006) para irrigação irrestrita de culturas folhosas (coliformes fecais ≤ 10.000 NMP 100 mL⁻¹), ou que se desenvolvem dentro do solo (coliformes fecais ≤ 1.000 NMP 100 mL⁻¹), normalmente consumidas cruas. Ovos de helmintos é outro parâmetro presente nas diretrizes da OMS e que deve ser observado. Nas análises de ovos de helmintos realizadas na ARD tratada nos LBF's não foi detectada a presença do patógeno. Cabe ressaltar que também não foram detectados ovos de helmintos no efluente proveniente da ETE Lageado (afluente dos LBF's). Portanto, considerando o parâmetro coliformes fecais (*E. coli*), a ARD tratada nos LBF's não poderia ser destinada para irrigação de culturas que são consumidas cruas ou que são cultivadas nas camadas superficiais do solo, sendo necessária a adoção de método de desinfecção.

4.4 Potencial fertilizante da água residuária doméstica tratada nos Leitões

Biológicos Filtrantes

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos- USEPA (1996), as concentrações de nutrientes normalmente encontradas em águas residuárias domésticas que passaram por tratamento secundário variam de 10-30 mg L⁻¹, 5-40 mgL⁻¹ e 10-30 mgL⁻¹ para nitrogênio total, fósforo total e potássio, respectivamente. Os valores médios encontrados para ARD tratada pelos LBF's estão dentro da faixa descrita pela USEPA, sendo N= 17,0 mg L⁻¹, P = 5,2 mg L⁻¹ e K = 16,0 mgL⁻¹ (Tabela 9).

Tabela 9- Concentração de nutrientes de interesse agrônomo na água residuária doméstica tratada nos LBF's

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
N (mg L ⁻¹ de N)	17,0	30,5	3,0	11,0	64,7
P (mg L ⁻¹ PO ₄ ³⁻)	5,2	9,4	2,3	2,6	50,0
K (mg L ⁻¹ de K)	16,0	22,7	5,6	5,4	33,7

C.V- Coeficiente de Variação; N- Nitrogênio total; P- Fósforo total; K- Potássio.

De acordo com dados do boletim da Companhia Nacional de Abastecimento- CONAB divulgado em dezembro de 2018, a quantidade mensal de hortaliças comercializadas nas Centrais Estaduais de Abastecimento- CEASAS variaram de 300.000- 350.000 toneladas (CONAB, 2018). Rodrigues (2019) afirma que a produção de hortaliças tem grande importância econômica e social em pequenas propriedades rurais, seja como atividade de subsistência ou realizada com a finalidade de comercialização da produção excedente em “feiras livres”. Considerando que comunidades rurais e populações tradicionais geralmente optem pela produção de hortaliças, é possível estimar o potencial fertilizante da ARD tratada pelos LBF's.

Alves e Segovia (2011) estimam que a necessidade hídrica no cultivo de hortaliças seja na faixa de 1,0 L s⁻¹ ha⁻¹ (86,4 m³ d⁻¹ ha⁻¹). Supondo que a área disponível para irrigação em comunidades rurais e populações tradicionais seja igual a 1,0 hectare (ha) e que a taxa de aplicação da água para produção de hortaliças seja equivalente a 31.536,0 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, e assumindo que os valores disponíveis para fertirrigação com ARD tratada nos LBF's fossem: 17,0 mg L⁻¹ (0,017 kg m³) para nitrogênio total, 5,2 mg L⁻¹ (0,005 kg m³) para fósforo total e 16,0 mg L⁻¹ (0,016 kg m³) para potássio, o potencial fertilizante anual da ARD para produção de hortaliças deverá ser igual a: 536,1 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio; 157,68 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de fósforo e 504,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de potássio. Todavia, é importante destacar que a ARD tratada nos LBF's não apresentou qualidade microbiológica para reúso agrícola na irrigação de hortaliças sendo assim necessário a adoção de método de desinfecção para seu reúso seguro na produção de hortaliças por comunidades rurais e populações tradicionais.

4.5 Eficiência dos Leitos Biológicos Filtrantes na remoção de matéria orgânica

Segundo Von Sperling (1991), a matéria orgânica presente na água residuária é a principal causadora de poluição hídrica devido ao consumo de oxigênio dissolvido por microrganismos no seu processo de estabilização. Os componentes orgânicos presentes na água residuária são compostos de proteínas, carboidratos, óleos, gorduras, uréia, entre outros. Por conta desta multiplicidade de compostos, geralmente a quantificação da matéria orgânica na água residuária é realizada através de métodos indiretos de medição do consumo de oxigênio como a determinação da DBO e da DQO. A Tabela 10 apresenta os valores de DBO e DQO para a ARD afluyente (entrada) e efluente (saída) dos LBF's.

Tabela 10- Concentração média de matéria orgânica na água residuária doméstica afluyente e efluente dos LBF's

	Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
Afluyente	DBO (mg L ⁻¹)	56,33	92,0	40,0	15,5	27,5
	DQO (mg L ⁻¹)	360,8	792,0	158,3	260,6	72,2
Efluente	DBO (mg L ⁻¹)	25,6	39,0	17,0	7,0	27,3
	DQO (mg L ⁻¹)	35,7	56,0	24,0	9,7	27,2

C.V- Coeficiente de Variação; DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio.

Taxa de aplicação superficial é a relação entre a carga aplicada por dia e a área superficial do leito. Cada LBF apresenta uma área superficial de 1,4 m² [(1m x 0,35 m) x 4 caixas]. As cargas aplicadas foram determinadas através da multiplicação da concentração encontrada para DBO e DQO na entrada nos LBF's pela vazão média diária liberada em cada leito (150 L d⁻¹). Os valores médios obtidos para taxa de aplicação superficial de DBO e DQO foram respectivamente, 6,0 g m⁻² dia⁻¹ e 39,0 g m⁻² dia⁻¹. A observação da razão DQO/DBO da taxa de aplicação de carga orgânica é muito importante, pois pode influenciar na escolha do método mais adequado de tratamento a ser empregado. O valor médio da razão DQO/DBO encontrado para ARD proveniente da ETE-Lageado foi 6,5. Quanto a razão DQO/DBO é maior que 3,5 ela é considerada elevada e indica que a fração não biodegradável (inerte) do efluente a ser tratado é alta sendo necessário além da aplicação de tratamento biológico,

aplicação de tratamento físico-químico para redução da fração inerte (VON SPERLING, 1991). Assim, o tratamento por LBF's é uma boa opção a ser adotada no tratamento de ARD em comunidades rurais e populações tradicionais, pois normalmente é eficiente tanto na remoção de materiais orgânicos quanto na redução de substâncias inorgânicas.

De acordo com Jordão e Pessoa (2011), a eficiência dos LBF's pode ser avaliada através da observação da mudança nas concentrações de poluentes no afluente e efluente dos LBF's. No que tange a redução da concentração de matéria orgânica, os LBF's apresentaram uma eficiência de remoção média de 50,9% para DBO (Figura 17) e 86,2% para DQO (Figura 18). A eficiência média na redução de DQO encontrada, é próxima aos resultados médios presentes no estudo desenvolvido por Nascimento (2001), em que durante as diferentes fases operacionais do leito biológico, a eficiência média de remoção de DQO variou de 74 a 88%. Já o valor médio de eficiência de remoção de DBO de 50,9% está em acordo com Burgos, López e Rodríguez (2015), que descrevem que leitos biológicos com taxas intermediárias de aplicação podem apresentar eficiência de remoção de DBO na faixa de 50 – 70%.

As Figuras 17 e 18 apresentam a eficiência e a taxa de remoção de DBO e DQO, respectivamente, em relação à taxa de aplicação. Pode-se observar uma correlação linear positiva entre a taxa de aplicação e a taxa de remoção da DBO e DQO. Resultados semelhantes ao relatado por Queluz (2016) para o alagado 1 (sem cultivo de plantas).

Figura 17- Eficiência e taxa de remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) dos leitos biológicos filtrantes em relação à taxa de aplicação superficial

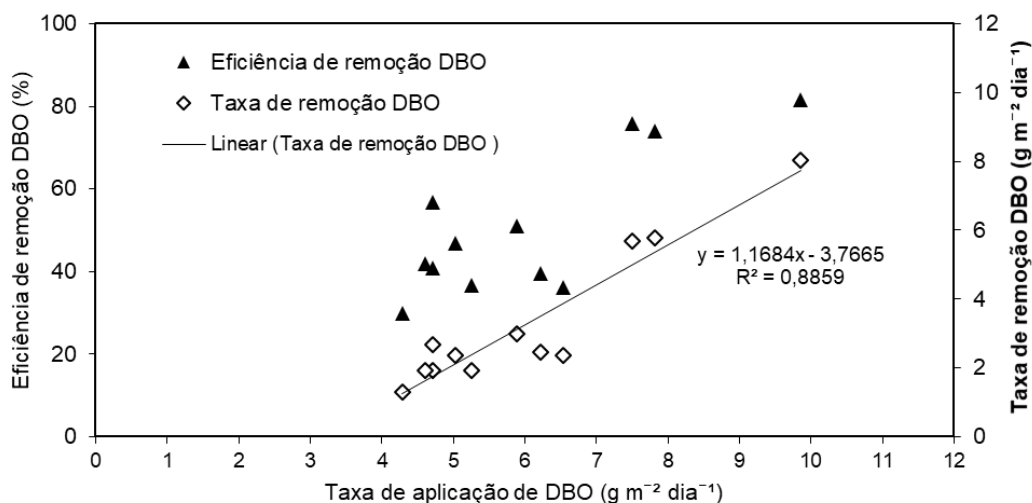
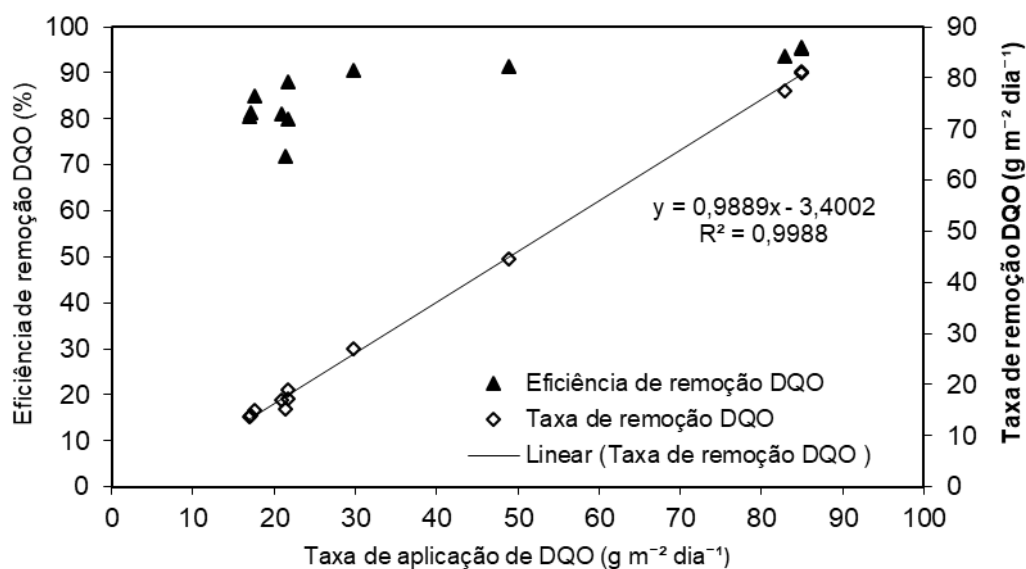


Figura 18- Eficiência e taxa de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) dos leitos biológicos filtrantes em relação à taxa de aplicação superficial



4.6 Eficiência dos Leitos Biológicos Filtrantes na remoção de sólidos

Das características físicas da ARD, o teor de sólidos é o de maior importância para o dimensionamento e funcionamento de sistemas de tratamento. O teor de sólidos contido na ARD pode ser classificado em função das dimensões das partículas (sólidos em suspensão, dissolvidos ou coloidais), da secagem em alta ou média temperatura (sólidos totais, voláteis, fixos, entre outros) e da sedimentabilidade (sólidos sedimentáveis, não sedimentáveis ou flotáveis) (JORDAO; PESSOA, 2011). De acordo com Von Sperling e Chenicharo (2005), a turbidez elevada da ARD é consequência da grande variedade de sólidos em suspensão. A Tabela 11 apresenta os resultados médios encontrados para a concentração de sólidos na ARD afluyente e efluente dos LBF's. O maior valor médio encontrado para sólidos suspensos totais-SST na água residuária tratada nos LBF's (efluente) foi de 26 mg L⁻¹, de acordo com Nakayama e Bucks (1991) águas que apresentem SST < 50 mg L⁻¹ apresentam risco baixo de entupimento para reúso em sistemas de irrigação localizada.

Tabela 11- Concentração média de sólidos suspensos totais, sólidos totais e turbidez na água residuária doméstica afluente e efluente dos LBF's

	Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
Afluente	SST (mg L ⁻¹)	397,0	1.278,0	135,0	372,0	93,7
	ST (mg L ⁻¹)	824,0	1.943,0	402,0	433,0	52,5
	Turbidez (NTU)	210,5	459,0	70,1	129,6	61,5
Efluente	SST (mg L ⁻¹)	10,68	26,00	4,33	6,14	57,4
	ST (mg L ⁻¹)	395,3	783,0	291,0	133,6	33,7
	Turbidez (NTU)	4,9	14,0	0,8	4,6	93,8

C.V- Coeficiente de Variação; SST – Sólidos Suspensos Totais; ST- Sólidos Totais; SDT- Sólidos Dissolvidos Totais.

A Figura 19 apresenta o aspecto do afluente e efluente dos LBF's, enquanto que o Figura 20 apresenta os resultados da eficiência de remoção de sólidos suspensos totais, sólidos totais e turbidez pelos LBF's durante as etapas do experimento. Os LBF's apresentaram eficiência de remoção média de 95,8%, 41,6% e 97,8%, para SST, ST e turbidez, respectivamente. A eficiência dos LBF's na remoção de SST foi maior que a obtida por Almeida (2007), que encontrou eficiência média de 80% para filtro biológico percolador com meio suporte espuma de poliuretano (*downflow hanging sponge-DHS*). Medeiros et al. (2017) obtiveram 89% de eficiência média na remoção de turbidez para filtro biológico percolador também com espuma de poliuretano como meio suporte. Este valor é inferior ao resultado médio de remoção de turbidez encontrado para os LBF's (97,8%).

Figura 19- Aspecto do efluente secundário proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Botucatu-ETE Lageado (A e B) e aspecto da ARD tratada pelos LBF's (C)

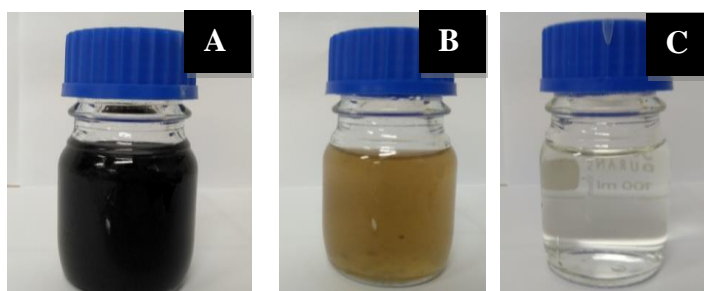
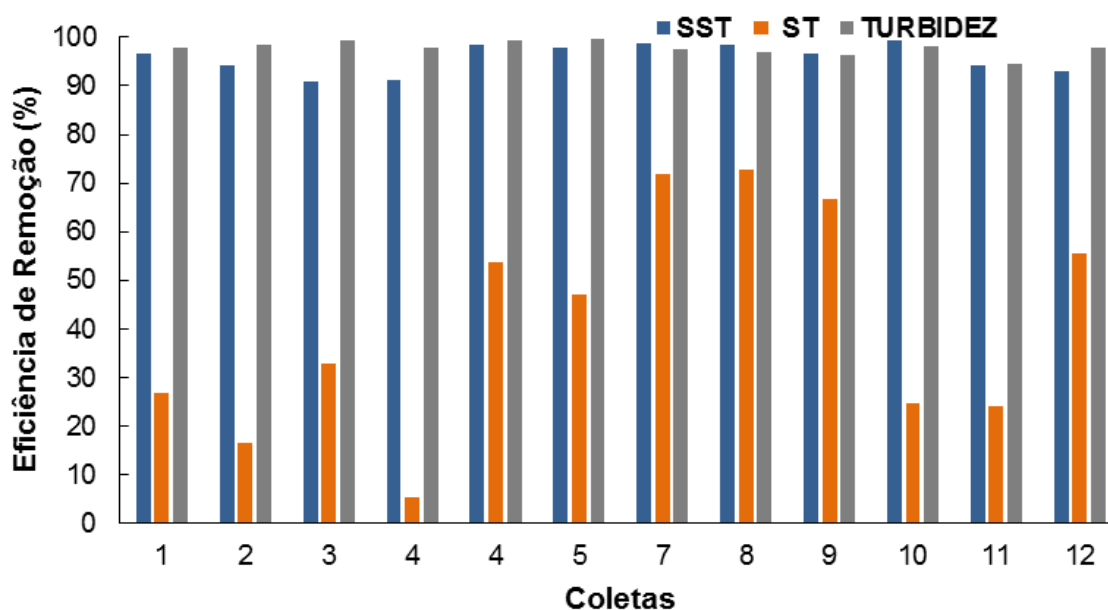


Figura 20- Eficiência de remoção de sólidos suspensos totais, sólidos totais e turbidez pelos LBF's durante as etapas do experimento



4.7 Eficiência dos Leitos Biológicos Filtrantes na remoção de patógenos

A Tabela 12 apresenta as concentrações de coliformes totais *E. coli* na ARD afluente e efluente dos LBF's. Observa-se que as concentrações de coliformes fecais (*E. coli*) do efluente ficaram acima do valor recomendado pela Organização Mundial de Saúde para reúso irrestrito na irrigação (WHO, 2006).

Tabela 12- Concentrações de coliformes totais *E. coli* na água residuária doméstica afluente e efluente dos LBF's

	Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Afluente	CT (NMP 100 mL ⁻¹)	1,76 x 10 ⁸	1,01 x 10 ⁹	7,90 X 10 ⁵	3,86 x 10 ⁸
	<i>E. coli</i> (NMP 100 mL ⁻¹)	1,07 x 10 ⁷	1,03 x 10 ⁸	3,10 x 10 ⁴	2,94 x 10 ⁷
Efluente	CT (NMP 100 mL ⁻¹)	3,50 x 10 ⁵	1,38 x 10 ⁶	2,93 x 10 ³	4,61 x 10 ⁵
	<i>E. coli</i> (NMP 100 mL ⁻¹)	4,4 x 10 ⁴	1,61 x10 ⁵	1,60 x 10 ²	6,04 x 10 ⁴

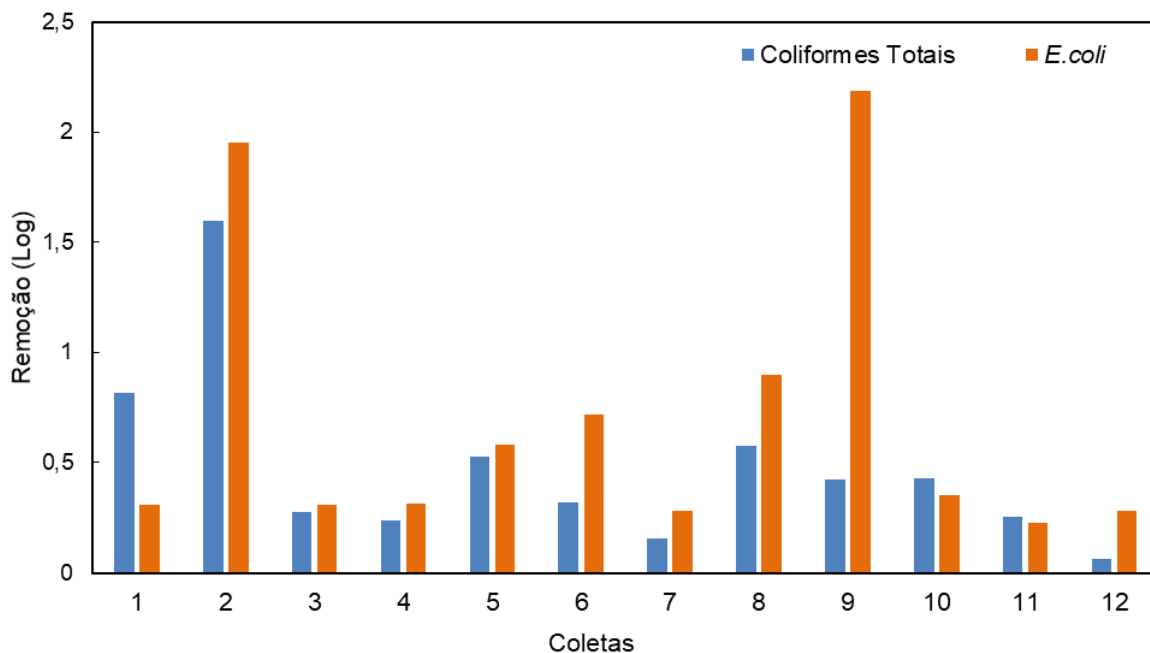
C.V- Coeficiente de Variação; CT- Coliformes Totais.

A remoção de coliformes totais e fecais, geralmente é analisada em termos de redução logarítmica, em que 1 log de redução é equivalente a redução de 90%, 2 logs a 99%, 3 logs a 99,9% e assim sucessivamente. A Figura 21 apresenta a remoção de

coliformes totais e fecais (*E. coli*) em log durante as etapas do experimento. Os valores de redução logarítmica variaram de 0,06 a 1,59 para coliformes totais e de 0,22 a 2,2 para *E. coli*, sendo as médias equivalentes a 0,5 e 0,7 para coliformes totais e *E. coli*, respectivamente. No estudo desenvolvido por Queluz (2016), o alagado sem “cultivo de plantas” apresentou valores médios de eficiência de remoção de *E. coli* na faixa de 0,8 a 2,9 logs, sendo os maiores valores de remoção obtidos na 3ª e última etapa do experimento, em comparação, os LBF’s apresentaram valores inferiores aos obtidos por Queluz (2016).

Como os LBF’s apresentaram redução logarítmica média menor que 1, pode-se afirmar que sua eficiência de remoção de coliformes totais e *E. coli* é menor que 90%. Ressalta-se que 1 log de redução indica que a população final é 10 vezes menor que a população inicial.

Figura 21- Remoção em log de coliformes totais e *E. coli* durante as etapas do experimento



4.8 Processo de desinfecção solar nos reatores SODIS

De acordo com Mustafa et al. (2013) o processo de desinfecção solar pode ser afetado pela variação da disponibilidade de luz solar ao longo das estações do ano (primavera, verão, outono, inverno). Por conta disso, o processo de desinfecção solar nos reatores SODIS foi avaliado durante o período outono-inverno (1ª etapa) e primavera-verão (2ª etapa). Sandec (2016) aponta que a desinfecção solar pode ser

influenciada pela profundidade da água, sendo recomendado uma profundidade de no máximo 10 cm. Além disso, os autores destacam que a concentração de sólidos e matéria orgânica também são fatores que podem prejudicar a dinâmica do processo de desinfecção.

Com o intuito de avaliar a influência da profundidade na eficiência de desinfecção solar nos reatores SODIS foram aplicadas lâminas de ARD iguais a 10, 15 e 20 cm de profundidade. Também, foram analisadas as concentrações iniciais de sólidos e matéria orgânica para cada lâmina.

As Tabelas 13 e 14 apresentam as características da ARD tratada no SODIS. Na Tabela 13 são apresentados os valores médios encontrados para o período outono-inverno, enquanto que, a Tabela 14 apresenta os valores médios obtidos para o período primavera-verão.

Tabela 13- Concentração de DQO, SST e turbidez no período outono-inverno para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
Lâmina de 10 cm					
DQO (mg L ⁻¹)	26,8	37,0	17,6	6,8	23,6
SST (mg L ⁻¹)	7,0	11,7	2,0	3,2	45,1
Turbidez (NTU)	1,8	2,9	1,2	0,6	31,9
Lâmina de 15 cm					
DQO (mg L ⁻¹)	27,8	33,0	15,7	6,6	23,7
SST (mg L ⁻¹)	5,3	10	1,7	2,8	53,8
Turbidez (NTU)	1,7	2,7	1,0	0,6	37,7
Lâmina de 20 cm					
DQO (mg L ⁻¹)	29,6	35,0	20,0	5,5	18,6
SST (mg L ⁻¹)	6,4	17	2,7	5,5	86,3
Turbidez (NTU)	1,7	2,7	1,0	0,6	34,6

DQO – Demanda Química de Oxigênio; SST – Sólidos Suspensos Totais

Tabela 14- Concentração de DQO, SST e turbidez no período primavera-verão para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	C.V (%)
Lâmina de 10 cm					
DQO (mg L ⁻¹)	34,8	49,0	13,0	12,6	36,2
SST (mg L ⁻¹)	9,5	15,0	4,0	4,2	44,5
Turbidez (NTU)	7,8	15	4,0	3,9	50,6
Lâmina de 15 cm					
DQO (mg L ⁻¹)	35,0	48,0	16,0	11,8	33,7
SST (mg L ⁻¹)	8,33	13,0	3,0	3,6	44,0
Turbidez (NTU)	7,2	16	3,0	4,6	63,8
Lâmina de 20 cm					
DQO (mg L ⁻¹)	36,2	54,0	18,0	12,3	34,1
SST (mg L ⁻¹)	10,5	16,0	3,0	5,0	48,5
Turbidez (NTU)	7,3	14,5	3,5	4,0	55,2

DQO – Demanda Química de Oxigênio; SST – Sólidos Suspensos Totais

O valor máximo encontrado para turbidez foi de 16,0 NTU (Tabela 14) no período primavera-verão e o valor mínimo observado foi de 1,0 NTU (Tabela 13) no período outono-inverno, esta alteração na qualidade da ARD pode ser consequência do desprendimento de porções do biofilme nos leitos biológicos filtrantes, uma vez que a ARD passou por processo de filtração biológica antes de ser direcionada ao SODIS. Destaca-se que os resultados médios obtidos para turbidez nos dois períodos foram inferiores ao valor de 30 NTU, estabelecido como limiar pela Sandec (2002) para obtenção de um processo eficaz de desinfecção solar.

Foram obtidas concentrações médias no intervalo de 26,8 a 36,2 mg L⁻¹ para DQO e de 10,5 a 5,3 mg L⁻¹ para SST, nas lâminas de ARD testadas (10,15 e 20 cm) nos dois períodos analisados. Estes resultados indicam que a ARD a ser tratada por radiação solar nos reatores SODIS apresenta baixo teor de sólidos e matéria orgânica.

As lâminas de ARD ficaram expostas à luz solar das 08:00 h às 18:00 h, ou seja, por um período de 10 horas. Além da concentração de *E. coli*, os parâmetros pH, DQO e temperatura foram analisados a cada 2 horas. As Figuras 22 e 24 apresentam os valores encontrados para pH e DQO ao longo do tempo de exposição solar para o

Figura 24- Concentração média de DQO ao longo do tempo de exposição solar no período outono-inverno para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS

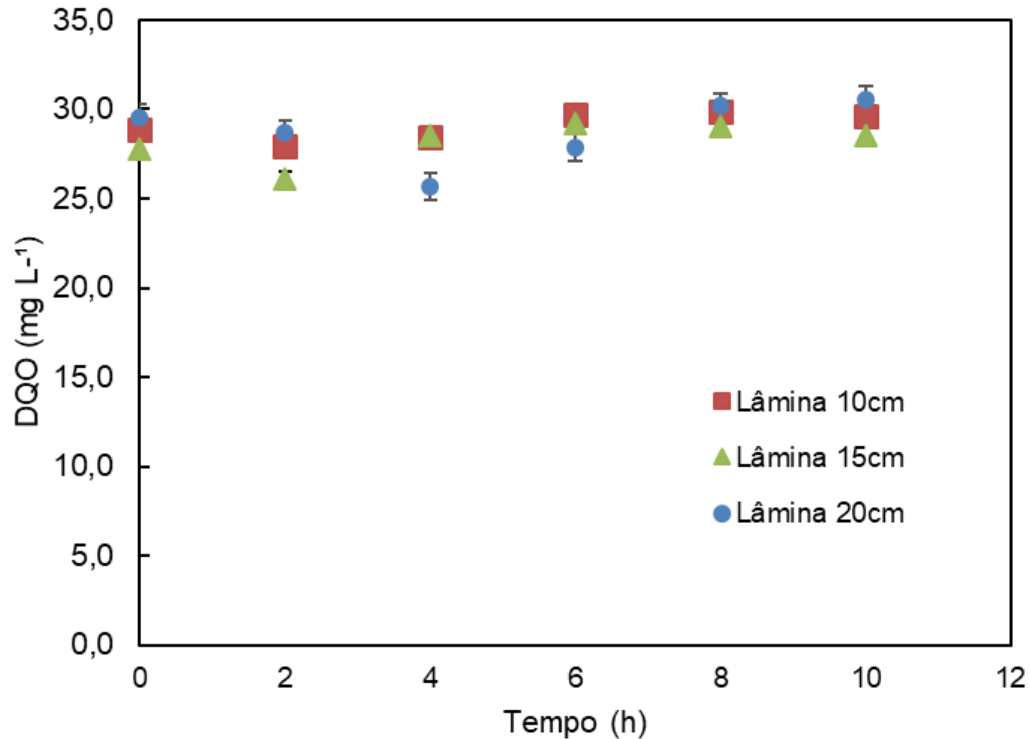
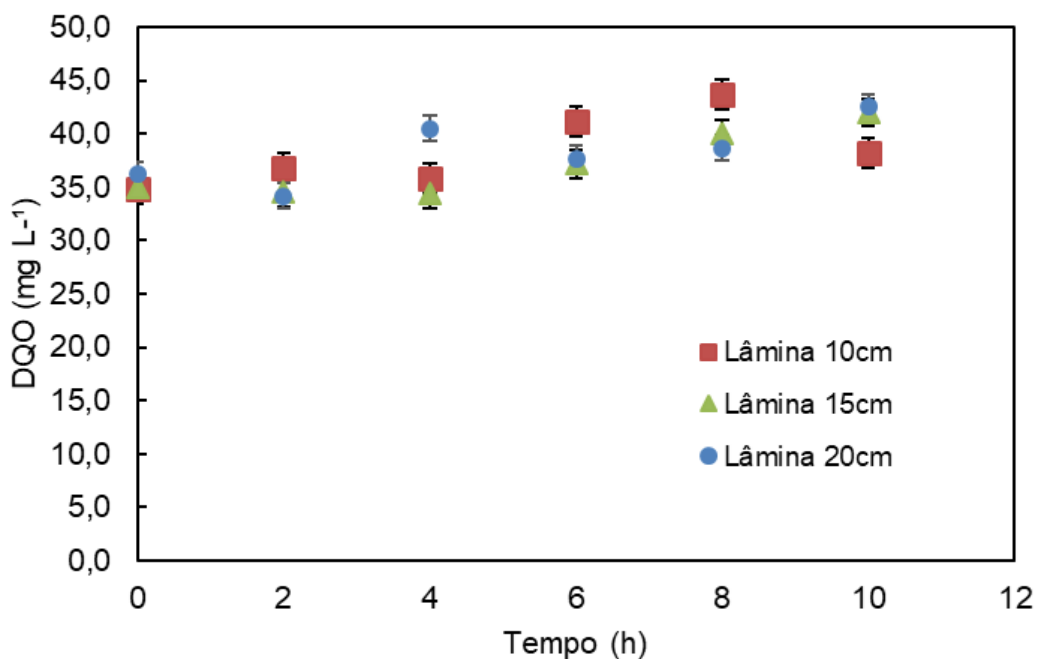


Figura 25- Concentração média de DQO ao longo do tempo de exposição solar no período primavera-verão para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm tratadas no SODIS



Ao longo do período de exposição solar observa-se um ligeiro aumento da DQO (Figuras 24 e 25). Nas análises realizadas no período outono-inverno a concentração média final (29,6-30,6 mg L⁻¹) de DQO aumentou aproximadamente 3% em relação ao valor da concentração média inicial (28,8-29,6 mg L⁻¹) para as três lâminas (10, 15 e 20 cm). Já nas análises para o período primavera-verão, cada lâmina apresentou diferentes percentuais de crescimento, 12% (de 34,8 mg L⁻¹ para 38,2 mg L⁻¹), 17% (de 35,0 mg L⁻¹ para 42,0 mg L⁻¹) e 15% (de 36,2 mg L⁻¹ para 42,5 mg L⁻¹) para as lâminas de 10, 15 e 20 cm de profundidade, respectivamente. Entretanto, pela análise de variância-ANOVA não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas.

O pH também sofreu variação ao longo do período de exposição à radiação solar nos dois períodos analisados (Figuras 22 e 23). Para o período outono-inverno os valores médios de pH para as três lâminas no início (t = 0 h) e final (t= 10 h) do tempo de exposição foram de 7,5 e 7,9, respectivamente, enquanto que, no período primavera-verão foram encontrados valores médios de pH de aproximadamente 7,5 e 8,7 no início e ao final do tempo de exposição, respectivamente. Em ambos períodos analisados, os valores médios de pH caracterizam a ARD como de qualidade 'alcalina', ou seja, com pH > 7. A análise de variância ANOVA apontou que existe diferença estatisticamente significativa para pH ao longo do tempo. Alves (2015) analisou a influência do pH no processo de desinfecção solar em reatores SODIS com adição de diferentes doses de peróxido de hidrogênio (25, 50, 75, 100 e 125 mg L⁻¹), e constatou que pH básico (> 7) pode resultar em uma melhoria do processo em todas as doses testadas.

4.8.1 Variação da temperatura nos reatores SODIS

As figuras 26, 27 e 28 apresentam os resultados médios obtidos para temperatura ao longo das 10 horas de exposição da ARD à radiação solar nos reatores com lâmina de 10, 15 e 20 cm, respectivamente.

Figura 26- Variação da temperatura ao longo do tempo de exposição solar para ARD no reator com lâmina de 10 cm para os períodos primavera-verão e outono inverno

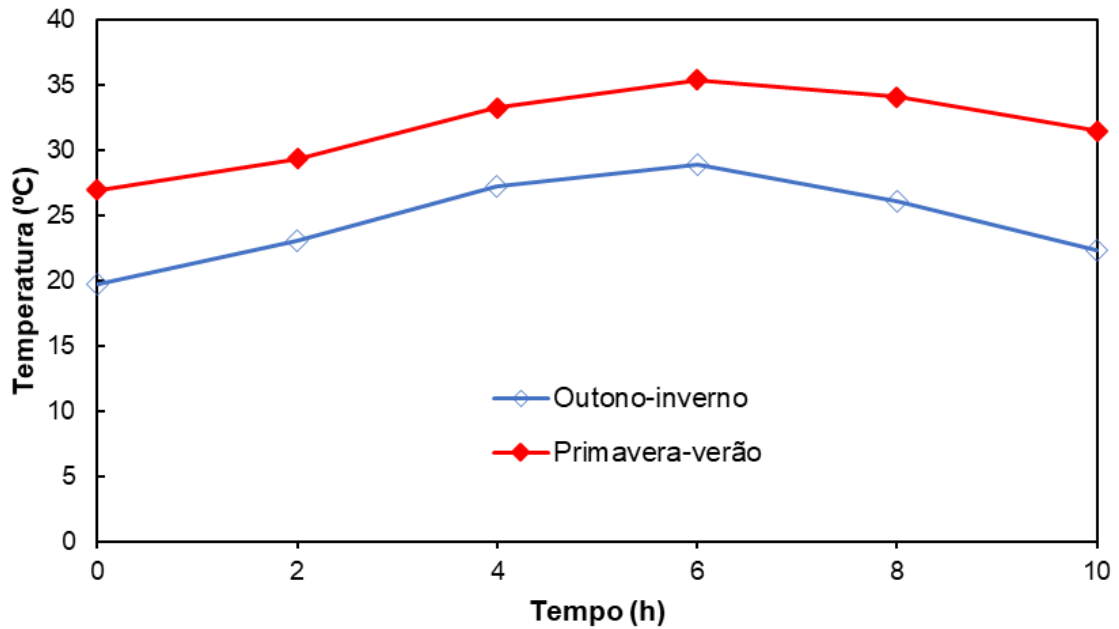


Figura 27- Variação da temperatura ao longo do tempo de exposição solar para ARD no reator com lâmina de 15 cm para os períodos primavera-verão e outono-inverno

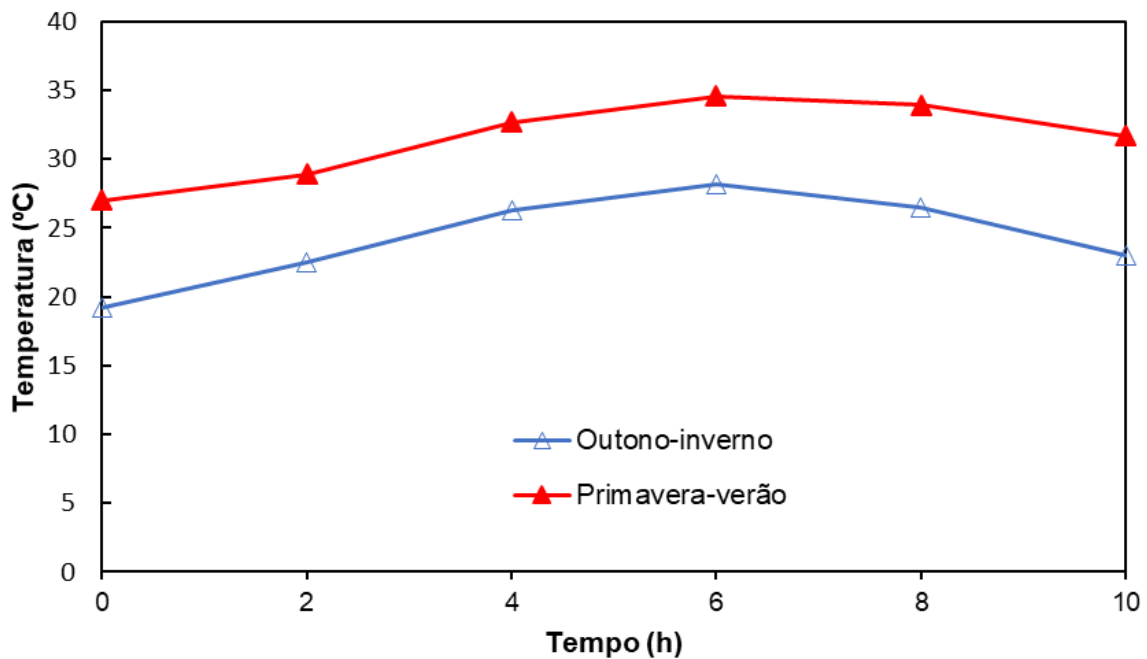
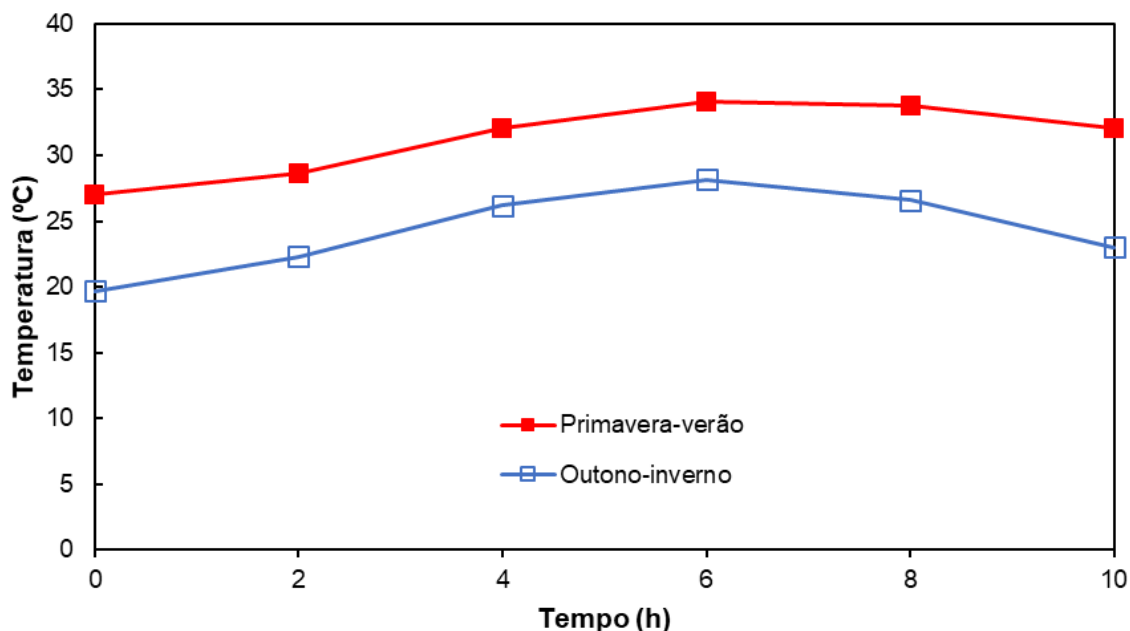


Figura 28- Variação da temperatura ao longo do tempo de exposição solar para ARD no reator com lâmina de 20 cm para os períodos primavera-verão e outono-inverno



Observa-se nas Figuras 26, 27 e 28 que o período primavera-verão apresentou valores médios de temperatura superiores ao período outono- inverno para todas as lâminas testadas (10, 15 e 20 cm). O período primavera-verão apresentou valores de aproximadamente 26°C para o tempo de exposição inicial $t= 0$ h (08:00 h) e 32°C para tempo de exposição final $t= 10$ h (18:00 h). O máximo valor médio observado para todas as lâminas foi de aproximadamente de 34°C no tempo de exposição $t= 6$ h (14:00 h). Para o período outono-inverno a temperatura em todos os SODIS (lâminas de 10,15 e 20 cm) variou de aproximadamente 19°C para $t= 0$ h a 28°C para $t= 6$ h. O valor médio no tempo de exposição $t = 10$ h foi de aproximadamente 23°C para os três reatores. Não houve mudança estatisticamente significativa na variação da temperatura entre as lâminas de ARD (10, 15 e 20 cm) testadas nos reatores SODIS, conforme análise estatística ANOVA ($p > 0,05$). Já na análise estatística multivariada com variável resposta a fração remanescente da população de *E. coli* (N/N_0 com $N =$ a população de *E. coli* remanescente após exposição à radiação solar e $N_0 =$ a população inicial de *E. coli* inicial) foi identificada uma diferença estatisticamente significativa. Entretanto, de acordo os estudos desenvolvidos por Wegelin et al. (1994); Fisher et. al. (2007) e Theitler et al. (2012), apenas temperaturas superiores a 45°C vão influenciar processos de inativação bacteriana por radiação solar, para

temperatura na faixa de 20 a 40°C o processo de desinfecção irá ocorrer essencialmente em função do aumento da dose de radiação.

4.8.2 Variação da radiação solar global em função das estações do ano

A dose de radiação solar global média no dia de avaliação após 10 horas de exposição das lâminas de ARD a luz solar foi de 13,90 MJ m⁻² para o período outono-inverno e de 15,95 MJ m⁻² para o período primavera-verão (Figura 29). A variação da radiação solar global ao longo das estações do ano pode ser melhor observada na Figura 30 que apresenta a dispersão da radiação solar acumulada das 08:00 h (t=0) as 18:00 h (t=10) nos reatores de desinfecção solar SODIS com lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm. Apesar da radiação solar global não ter sido mensurada individualmente para cada profundidade de lâmina de ARD testada, é possível inferir a radiação UV-A remanescente em cada lâmina, considerando a profundidade (10, 15 e 20 cm) e o nível de turbidez da ARD (resultado médio encontrado de aproximadamente 5 NTU). Segundo Sommer et al. (1997) para águas com turbidez igual a 26 NTU o percentual remanescente de UV-A será de aproximadamente 50% na profundidade de 10 cm, 35% na profundidade de 15 cm e 20% na profundidade de 20 cm (Figura 8). Assim, pode-se deduzir que há diferenças entre as lâminas testadas em relação à radiação solar global acumulada

Figura 29- Radiação solar global média acumulada ao longo do tempo de exposição solar da ARD nos períodos primavera-verão e outono-inverno

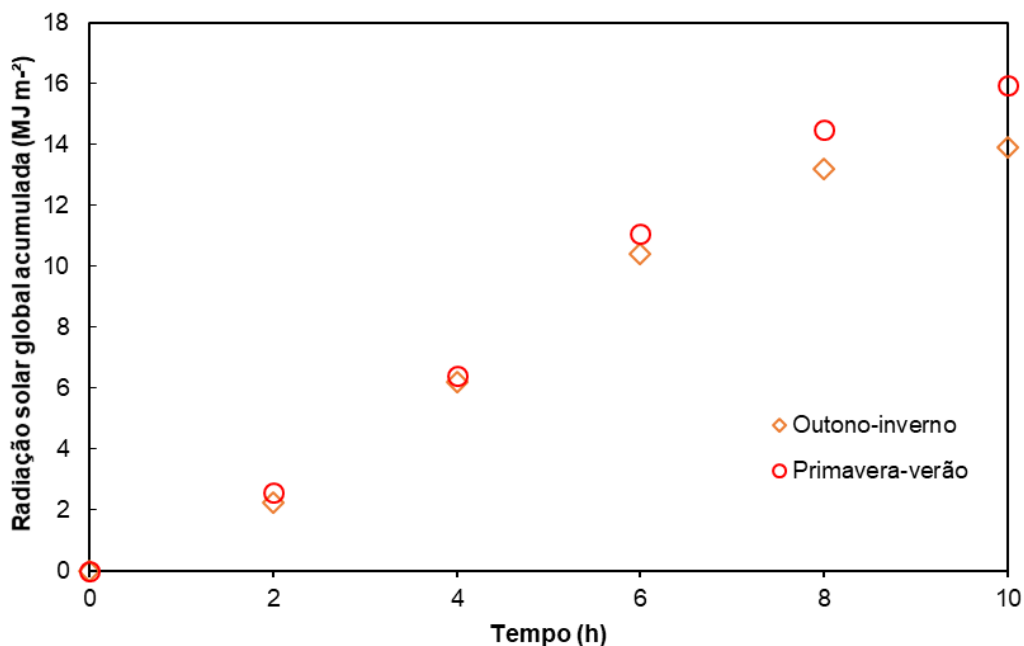
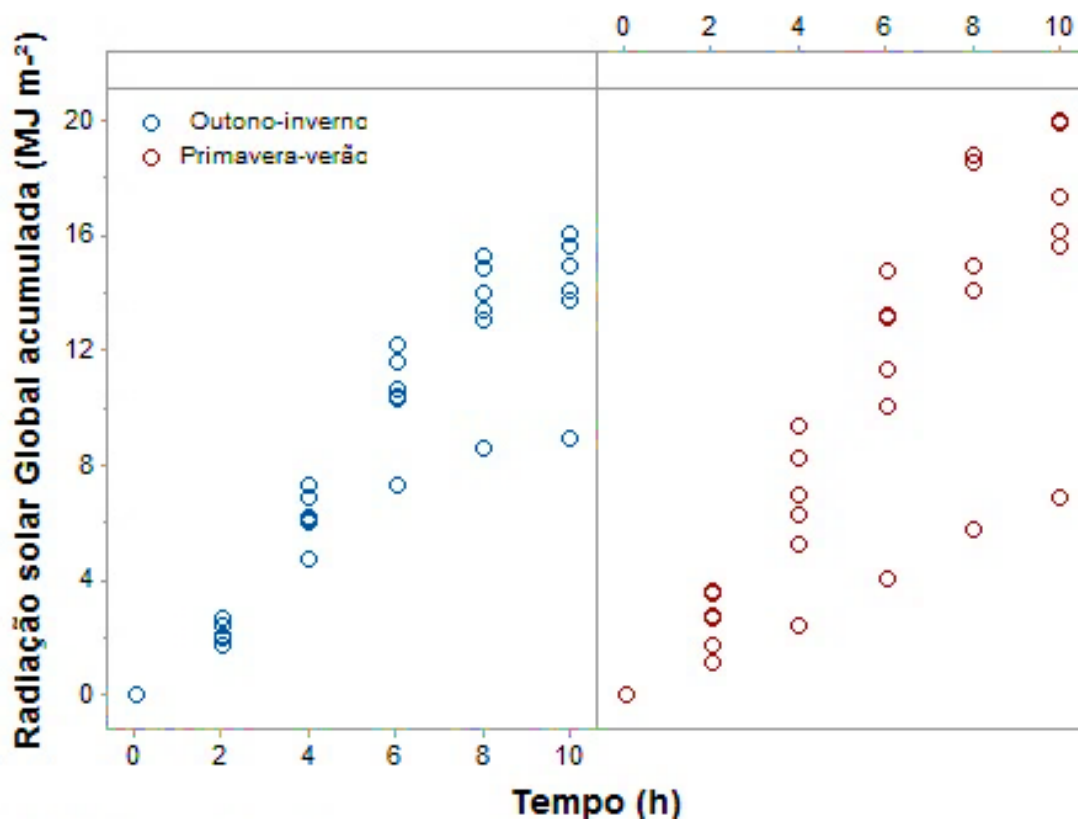


Figura 30- Gráfico de dispersão da radiação solar global acumulada em função do período de exposição solar da ARD nas etapas primavera-verão e outono-inverno



4.8.3 Redução logarítmica da concentração de coliformes fecais na ARD

As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados médios encontrados para temperatura, dose de radiação solar global, concentração e redução logarítmica da população de coliformes fecais (*E. coli*) ao longo do tempo de exposição à radiação solar, para os períodos outono-inverno e primavera-verão, respectivamente.

Tabela 15- Variações médias da temperatura, dose de radiação solar global, concentração e redução logarítmica da população de coliformes fecais (*E. coli*) no período outono-inverno, para os SODIS com lâminas de ARD com 10, 15 e 20 cm de profundidade

<i>E. coli</i> (NMP 100 mL ⁻¹)	Tempo de exposição (h)	Dose de radiação solar global (MJ m ⁻²)	Redução logarítmica (Log)	Temperatura (°C)
Lâmina de 10 cm				
1,33 x 10 ⁴	0	0	0	19,7
1,68 x 10 ³	2	2,2	1,2	23,1
1,56 x 10 ²	4	6,2	1,8	27,2
1,78 x 10 ¹	6	10,4	3,0	28,9
9,05 x 10 ⁰	8	13,2	3,1	26,1
5,63 x 10 ⁰	10	13,9	3,3	22,3
Lâmina de 15 cm				
1,80 x 10 ⁴	0	0	0	19,3
2,34 x 10 ³	2	2,2	1,0	22,5
1,80 x 10 ²	4	6,2	1,9	26,3
4,53 x 10 ¹	6	10,4	2,6	28,2
2,62 x 10 ¹	8	13,2	2,9	26,5
1,03 x 10 ¹	10	13,9	3,3	23,1
Lâmina de 20 cm				
2,57 x 10 ⁴	0	0	0	19,7
2,64 x 10 ³	2	2,2	1,0	22,3
2,92 x 10 ²	4	6,2	1,9	26,2
6,52 x 10 ¹	6	10,4	2,5	28,2
2,60 x 10 ¹	8	13,2	3,0	26,6
1,75 x 10 ¹	10	13,9	3,2	23,0

Tabela 16- Variações médias da temperatura, dose de radiação solar global, concentração e redução logarítmica da população de coliformes fecais (*E. coli*) no período primavera-verão, para os SODIS com lâminas de ARD com 10, 15 e 20 cm de profundidade

<i>E. coli</i> (NMP 100 mL⁻¹)	Tempo de exposição (h)	Dose de radiação solar global (MJ m⁻²)	Redução logarítmica (Log)	Temperatura (°C)
Lâmina de 10 cm				
7,69 x 10 ⁴	0	0	0	26,9
2,46 x 10 ³	2	2,6	1,3	29,4
4,30 x 10 ¹	4	6,4	3,0	33,2
1,08 x 10 ¹	6	11,1	3,6	35,4
6,25 x 10 ⁰	8	14,5	3,7	34,1
2,38 x 10 ¹	10	16,0	3,2	31,5
Lâmina de 15 cm				
8,17 x 10 ⁴	0	0	0	27,0
2,6 x 10 ³	2	2,6	1,4	28,9
6,26 x 10 ¹	4	6,4	2,7	32,7
1,74 x 10 ¹	6	11,1	3,1	34,6
5,88 x 10 ⁰	8	14,5	3,6	33,9
3,68 x 10 ⁰	10	16,0	3,7	31,7
Lâmina de 20 cm				
7,40 x 10 ⁴	0	0	0	27,0
1,90 x 10 ³	2	2,6	1,3	28,7
1,53 x 10 ²	4	6,4	2,4	32,1
1,62 x 10 ¹	6	11,1	3,5	34,1
8,47 x 10 ⁰	8	14,5	3,6	33,8
1,03 x 10 ¹	10	16,0	3,3	32,0

Observa-se que com 4 horas de exposição solar, tanto no período outono-inverno (Tabela 15) quanto no período primavera-verão (Tabela 16) todas as lâminas de ARD testadas nos reatores de desinfecção solar-SODIS atingiram valores de coliformes fecais (*E. coli*), em acordo com a diretriz estabelecida pela Organização Mundial de Saúde para irrigação irrestrita (coliformes fecais ≤ 1.000 NMP 100 mL⁻¹) (WHO, 2006). Nota-se, que a ARD tratada nos LBF's e direcionada aos reatores

SODIS apresentou concentração inicial média de *E. coli* \geq a 10^4 NMP 100 mL⁻¹. A ação da radiação solar acumulada após 10 h de exposição foi responsável pela redução desta concentração média a valores \leq 6 NMP 100 mL⁻¹ no período outono-inverno e \leq 4 NMP 100 mL⁻¹ no período primavera verão.

De acordo com estudo desenvolvido por Wegelin et al. (1994), com amostras de água em tubos de quartzo expostas à radiação solar, para uma redução logarítmica de 3 log da população de *E. coli* em águas que apresentem temperatura na faixa de 20 a 40°C é necessária uma dose de radiação solar igual a 2 MJ m⁻², correspondente a aproximadamente 5 horas de exposição a luz solar em latitudes médias. Em comparação com o processo de desinfecção solar das lâminas de ARD com 10, 15 e 20 cm de profundidade, o comportamento obtido por Wegelin et al. (1994) não foi observado nos reatores SODIS. Uma dose de radiação solar de 2 MJ m⁻² (tempo de exposição = 2 h) resultou em uma redução logarítmica média da *E. coli* na faixa de 1 a 1,3 log para todas as lâminas (10,15 e 20 cm) nos dois períodos testados, sendo uma redução logarítmica média da população de *E. coli* na faixa de 2,5 a 3,6 log, observada com 6 horas de exposição à radiação solar, cuja dose de radiação solar global acumulada média foi de aproximadamente 10 MJ m⁻² no período outono-inverno (Tabela 15) e de 11 MJ m⁻² no período primavera-verão (Tabela16). É importante destacar que o volume de ARD tratado nos reatores SODIS (10 cm = 50 L; 15 cm = 100 L e 20 cm = 170 L) é maior que o volume tratado nos tubos de quartzo o que pode demandar uma dose de radiação superior para obtenção dos mesmos valores de redução logarítmica da população de *E. coli*.

Estudos desenvolvidos por Sandec (2016) demonstram que um período de seis horas de exposição de garrafas pets à radiação solar pode provocar uma redução logarítmica de 2 a 5 log da população de *E. coli*. Nos reatores SODIS, considerando os dois períodos analisados, as lâminas de ARD com seis horas de exposição solar apresentaram redução logarítmica média da população de *E. coli* na faixa de 3,0 a 3,6 log, 2,6 a 3,1 log e 2,5 a 3,5 log, para as lâminas com profundidades de 10 cm, 15 e 20 cm, respectivamente (Tabelas 15 e 16). Analisando os resultados encontrados para o período de seis horas de exposição à radiação solar, percebe-se que eles estão dentro da faixa apresentada nos estudos desenvolvidos por Sandec (2016).

Através da ferramenta de extensão do Excel “GInaFit” (Geeraerd and Van Impe Inactivation Model Fitting Tool) e com a aplicação do modelo de log linear com *tail* (cauda) desenvolvido por Geeraerd, Herremans e Van Impe (2000) curvas de

inativação da *E. coli* ao longo do tempo foram geradas para as lâminas de ARD com 10, 15 e 20 cm de profundidade para os períodos outono- inverno e primavera-verão. As Figuras 31, 32 e 33 mostram as curvas de inativação da *E. coli* geradas para as lâminas de ARD de 10,15 e 20 cm, respectivamente.

Para a lâmina de ARD de 10 cm de profundidade (Figura 31), é possível observar uma queda acentuada da concentração de *E. coli* nas primeiras 4 horas de exposição à radiação solar para o período primavera-verão, enquanto que, para o período outono-inverno este fenômeno é observado nas primeiras 6 horas de exposição solar.

As lâminas de ARD de 15 e 20 cm de profundidade, Figuras 32 e 33, respectivamente, apresentaram comportamento similar quanto a inativação de *E. coli*, observa-se uma queda acentuada da concentração de *E. coli* nas primeiras 6 horas de exposição à radiação solar tanto no período primavera-verão quanto no período outono-inverno.

Figura 31- Curva de inativação da *E. coli* (em \log_{10}) na lâmina de água residuária doméstica com 10 cm de profundidade nos períodos outono-inverno e primavera-verão

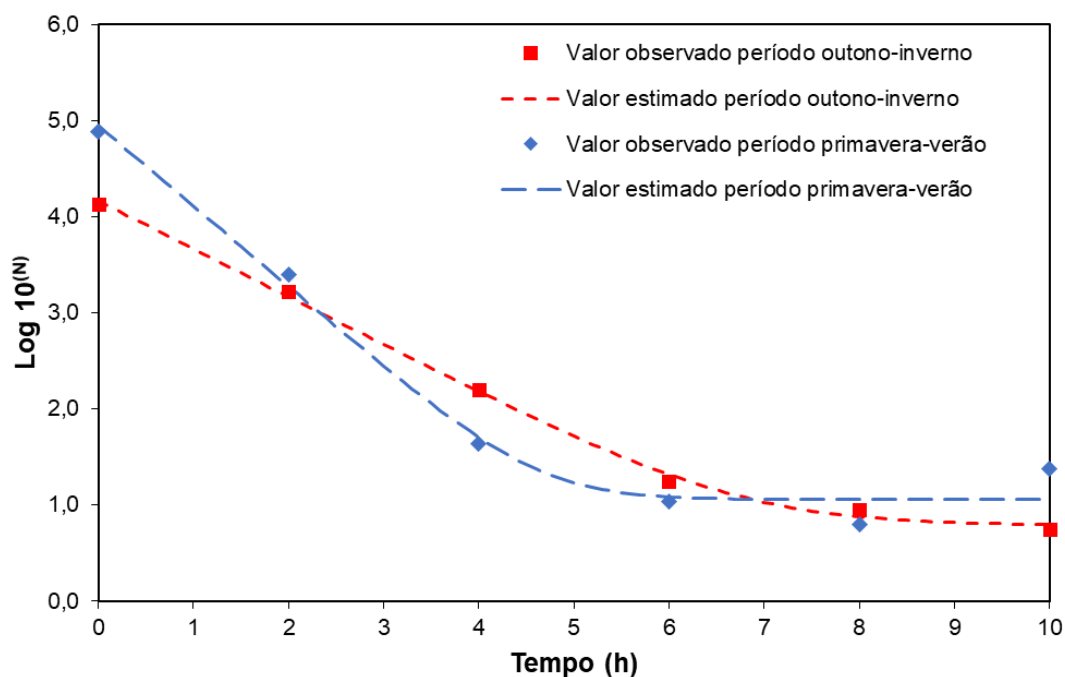


Figura 32- Curva de inativação da *E. coli* (em \log_{10}) na lâmina de água residuária doméstica com 15 cm de profundidade nos períodos outono-inverno e primavera-verão

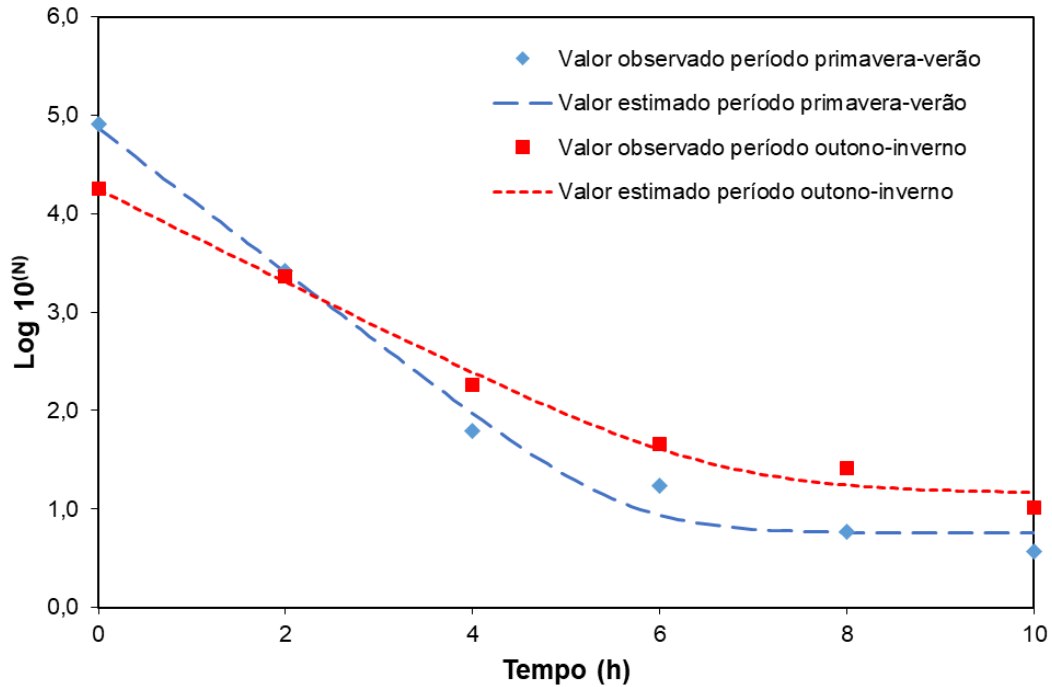
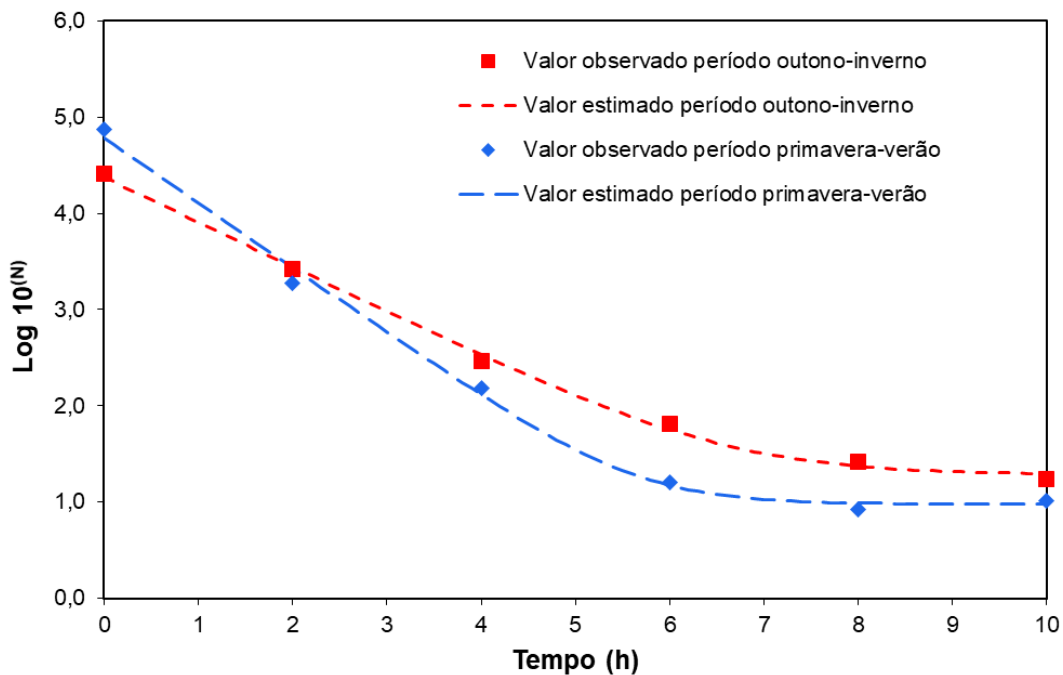


Figura 33- Curva de inativação da *E. coli* (em \log_{10}) na lâmina de água residuária doméstica com 20 cm de profundidade nos períodos outono-inverno e primavera-verão



4.8.4 Reativação bacteriana

A Tabela 17 apresenta os resultados dos valores de reativação da *E. coli* encontrados para o período de 48 horas e 72 horas. Observa-se que a reativação foi praticamente nula, indicando que a dose de radiação solar global recebida pelas bactérias *E. coli* pode ser considerada uma 'dose letal' porque causou danos irreversíveis ao DNA do organismo.

Tabela 17- Reativação da bactéria *E. coli* (NMP 100 mL⁻¹) após 48 e 72 horas do processo de desinfecção por radiação solar global nos reatores SODIS

Tempo	10 cm	15 cm	20 cm
13/02/2019			
48 horas	0 NMP 100 mL ⁻¹	0 NMP 100 mL ⁻¹	0 NMP 100 mL ⁻¹
72 horas	1,0 NMP 100 mL ⁻¹	0 NMP 100 mL ⁻¹	0 NMP 100 mL ⁻¹
14/03/2019			
48 horas	1,0 NMP 100 mL ⁻¹	2,0 NMP 100 mL ⁻¹	0 NMP 100 mL ⁻¹
72 horas	1,0 NMP 100 mL ⁻¹	15,2 NMP 100 mL ⁻¹	2,0 NMP 100 mL ⁻¹
20/03/2019			
48 horas	2,0 NMP 100 mL ⁻¹	1,0 NMP 100 mL ⁻¹	7,0 NMP 100 mL ⁻¹
72 horas	0 NMP 100 mL ⁻¹	0 NMP 100 mL ⁻¹	0 NMP 100 mL ⁻¹

4.9 Modelo matemático

No estudo desenvolvido por Sánchez-Román et al. (2007), foi proposto um modelo matemático que representa a população remanescente de coliformes fecais (*E. coli*) em águas residuárias domésticas após serem expostas à radiação solar. A equação tem como variáveis a profundidade da lâmina de ARD e a dose de radiação solar. Já Queluz e Sánchez-Román (2014), desenvolveram um modelo para o cálculo da concentração final de *E. coli* na ARD, considerando como variáveis a dose de radiação solar acumulada e a concentração de sólidos suspensos totais, sendo a profundidade da lâmina de ARD igual a 10 cm. Em ambos trabalhos, foi utilizada a função sigmoide (*S-shape function*) no ajuste dos modelos.

Os resultados obtidos na análise estatística multivariada com as variáveis: temperatura, dose de radiação solar global acumulada (D), DQO (mg L⁻¹) e pH, tendo como variável resposta (y), a razão (N/No) que representa a população de *E. coli*

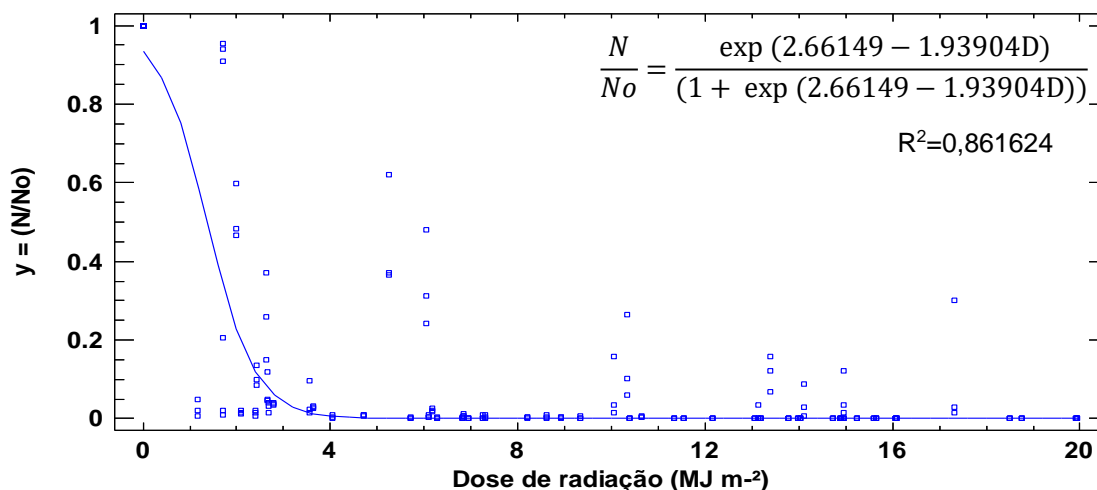
remanescente, considerando a população de *E. coli* após exposição à radiação solar (N) e a população inicial de *E. coli* na ARD (No) apontam que existe diferença estatisticamente significativa para os parâmetros dose de radiação solar global acumulada, pH e temperatura. Entretanto, entre estes parâmetros apenas a dose de radiação solar global e a temperatura são parâmetros que podem ser facilmente obtidos para comunidades rurais e populações tradicionais sem a necessidade de uso de equipamentos para medição direta, uma vez que, dados de radiação solar global e temperatura podem ser obtidos em estações meteorológicas locais ou que computem dados para a região onde o reator solar-SODIS será instalado. Contudo, devido ao grande volume de ARD tratado nos reatores SODIS (10 cm = 50 L; 15 cm = 100 L e 20 cm = 170 L) dificilmente a ARD alcançará valores de temperatura superiores a 45°C, considerado o '*breaking point*' para resultar uma contribuição significativa da temperatura no processo de inativação bacteriana. Diante do exposto, para o desenvolvimento dos modelos matemáticos foi considerado apenas o parâmetro dose de radiação solar global.

Na comparação das lâminas de ARD com profundidade de 10, 15 e 20 cm através da análise de variância- ANOVA, com a variável resposta a razão (N/No), em que (N) representa a população de *E. coli* remanescente após exposição solar e (No) a população inicial de *E. coli* na ARD, não foi identificada diferença significativa entre as profundidades de ARD testadas. Por conta disso, elas foram agrupadas em um único modelo (Equação 5). Também, devido ao fato dos reatores SODIS reduzirem a concentração de coliformes fecais (*E. coli*) a valores em acordo com a diretriz estabelecida pela OMS para irrigação irrestrita (coliformes fecais ≤ 1.000 NMP 100 mL⁻¹) nos dois períodos analisados (outono-inverno e primavera-verão), os dados obtidos para cada período também foram agrupados no mesmo modelo (Equação 5). A figura 34 mostra a fração da população remanescente de coliformes fecais (y) em relação à dose de radiação solar global acumulada nos reatores SODIS estudados.

$$\frac{N}{No} = \frac{\exp(2.66149 - 1.93904D)}{(1 + \exp(2.66149 - 1.93904D))} \quad (5)$$

Em que, N = população de *E. coli* presente na ARD após exposição solar (NMP 100 mL⁻¹); No = população inicial de *E. coli* presente na ARD antes da exposição solar (NMP 100 mL⁻¹); e D= Dose de radiação solar global recebida pela ARD (MJ m⁻²)

Figura 34- Dados experimentais e estimados através do modelo de regressão não linear (equação 5) para todas as lâminas de água residuária doméstica tratada nos reatores SODIS



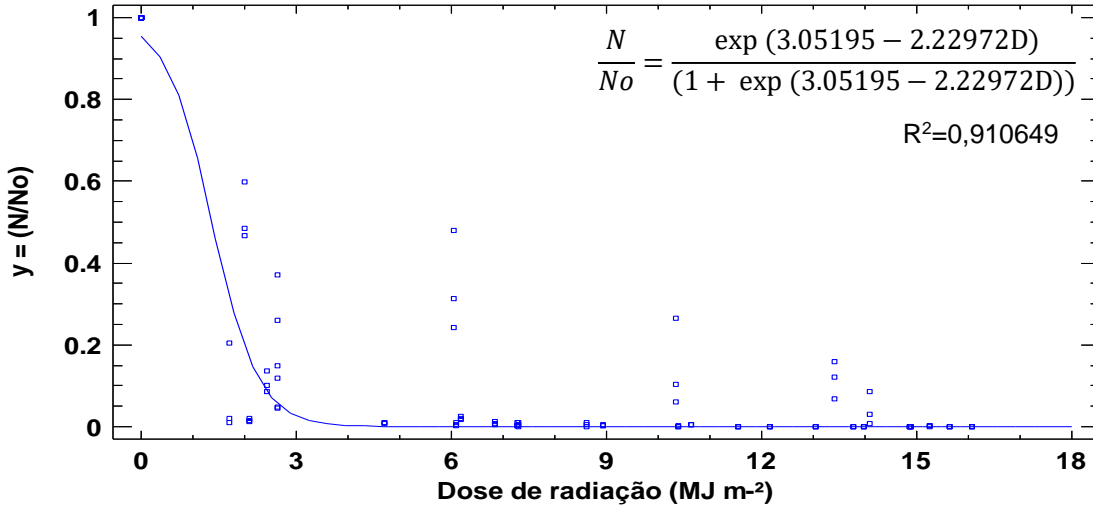
Devido à variação da radiação solar global ao longo do ano, foram desenvolvidos modelos matemáticos para os períodos outono-inverno e primavera-verão que são apresentados as Figuras 35 e 36, referente as Equações 6 e 7.

a) Modelo desenvolvido para o período outono-inverno

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\exp(3.05195 - 2.22972D)}{1 + \exp(3.05195 - 2.22972D)} \quad (6)$$

Em que, N = população de *E. coli* presente na ARD após exposição solar (NMP 100 mL⁻¹); No = população inicial de *E. coli* presente na ARD antes da exposição solar (NMP 100 mL⁻¹); e D= Dose de radiação solar global recebida pela ARD (MJ m⁻²)

Figura 35- Dados experimentais e estimados através do modelo de regressão não linear (equação 6) para todas as lâminas de água residuária doméstica tratada nos reatores SODIS no período outono-inverno

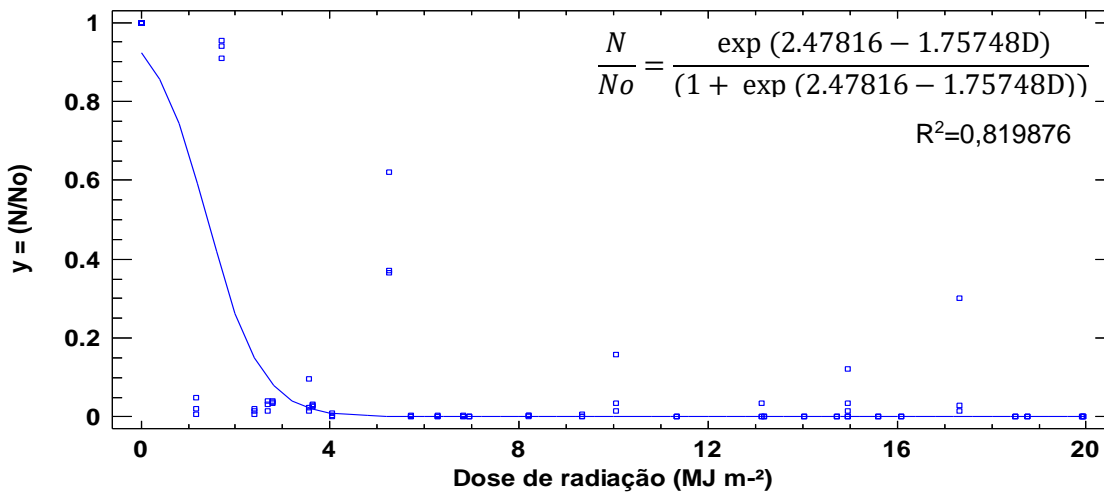


b) Modelo desenvolvido para o período primavera-verão

$$\frac{N}{No} = \frac{\exp(2.47816 - 1.75748D)}{1 + \exp(2.47816 - 1.75748D)} \quad (7)$$

Em que, N = população de *E. coli* presente na ARD após exposição solar (NMP 100 mL⁻¹); No = população inicial de *E. coli* presente na ARD antes da exposição solar (NMP 100 mL⁻¹); e D= Dose de radiação solar global recebida pela ARD (MJ m⁻²)

Figura 36- Dados experimentais e estimados através do modelo de regressão não linear (equação 7) para todas as lâminas de água residuária doméstica tratada nos reatores SODIS no período primavera-verão



4.9.1 Simulação de cenários

Os modelos matemáticos gerados neste estudo permitem a construção de cenários para verificação da dose de radiação solar global necessária para a desinfecção solar da ARD ao valor recomendado pela OMS para irrigação irrestrita (coliformes fecais ≤ 1.000 NPM 100 mL^{-1}). Considerando o modelo desenvolvido com os dados dos dois períodos analisados (outono-inverno e primavera-verão) e com os valores obtidos para as lâminas de 10, 15 e 20 cm agrupados (Figura 34, Equação 5), foram geradas informações sobre a dose de radiação solar acumulada necessária para a desinfecção da ARD ao valor recomendado pela OMS para irrigação irrestrita (Tabela 18).

Tabela 18- Simulação de cenários para verificação da dose de radiação solar global requerida na desinfecção solar da ARD para reúso na irrigação irrestrita

$$\text{Equação: } \frac{N}{N_0} = \frac{\exp(2.66149 - 1.93904D)}{(1 + \exp(2.66149 - 1.93904D))}$$

Concentração inicial de <i>E. coli</i> (No) NPM 100 mL^{-1}	Concentração final de <i>E. coli</i> (N) NPM 100 mL^{-1}	Fração remanescente de <i>E. coli</i> (N/No)	Dose de radiação solar global requerida (D)
$4,0 \times 10^9$	1.000	0,00000025	9,21 MJ m^{-2}
$4,0 \times 10^8$	1.000	0,0000025	8,02 MJ m^{-2}
$4,0 \times 10^7$	1.000	0,000025	6,84 MJ m^{-2}
$4,0 \times 10^6$	1.000	0,00025	5,65 MJ m^{-2}
$4,0 \times 10^5$	1.000	0,0025	4,52 MJ m^{-2}
$4,0 \times 10^4$	1.000	0,025	3,35 MJ m^{-2}

*Segundo Gonçalves (2003) os valores de *E. coli* em efluentes sanitários vão de 10^6 a 10^9 org/100 mL

5 CONCLUSÕES

Os LBF's foram eficientes na remoção de matéria orgânica e teor de sólidos da ARD. Eles promoveram uma melhoria da qualidade da ARD ao realizar a redução média de 50,9% da concentração de DBO inicialmente presente na ARD, 86,2% da DQO inicial, 95,8% da concentração inicial de SST, 41,6% dos ST e 97,8% da turbidez.

A ARD filtrada pelos LBF's após ser direcionada aos reatores de desinfecção solar-SODIS apresentou qualidade em acordo com a diretriz estabelecida pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para irrigação irrestrita (coliformes fecais ≤ 1.000 NMP 100 mL^{-1}) com tempo de exposição solar igual a quatro horas e com aproximadamente 6 MJ m^{-2} de dose de radiação solar global acumulada tanto no período outono-inverno quanto no período primavera-verão. A reativação bacteriana após 48 e 72 horas do processo de desinfecção solar foi praticamente nula.

Para ARD com concentrações médias na faixa de 26,8 a 36,2 mg L^{-1} de DQO, 5,3 a 10,5 mg L^{-1} de SST e turbidez ≤ 5 NTU, a inativação de coliformes fecais (*E. coli*) nos reatores SODIS foi eficiente independentemente da profundidade da lâmina de ARD testada (10, 15 ou 20 cm), reduzindo concentrações médias de *E. coli* de 10^4 NMP 100 mL^{-1} a valores ≤ 6 NMP 100 mL^{-1} .

Não foram detectados ovos de helmintos na ARD proveniente da ETE Lageado (afluente dos LBF's) e na ARD tratada pelos LBF's e SODIS.

Para as mesmas condições do presente estudo a população remanescente de *E. coli* em águas residuárias domésticas após exposição à radiação solar pode ser calculada pelas equações:

$$\text{a) } \frac{N}{N_0} = \frac{\exp(2.66149 - 1.93904 * D)}{(1 + \exp(2.66149 - 1.93904 * D))} \text{ considerando os dados dos dois}$$

períodos analisados;

$$\text{b) } \frac{N}{N_0} = \frac{\exp(3.05195 - 2.22972 * D)}{(1 + \exp(3.05195 - 2.22972 * D))} \text{ considerando apenas os dados do}$$

período outono-inverno;

$$\text{c) } \frac{N}{N_0} = \frac{\exp(2.47816 - 1.75748 * D)}{(1 + \exp(2.47816 - 1.75748 * D))} \text{ considerando apenas os dados}$$

do período primavera-verão;

Em que, N = população de *E. coli* presente na ARD após exposição solar ($\text{NMP}100 \text{ mL}^{-1}$); N_0 = população inicial de *E. coli* presente na ARD antes

da exposição solar ($NMP100 \text{ mL}^{-1}$); e D = Dose de radiação solar global recebida pela ARD (MJ m^{-2}).

Recomenda-se o uso da equação: $\frac{N}{N_0} = \frac{\exp(2.66149 - 1.93904 * D)}{(1 + \exp(2.66149 - 1.93904 * D))}$, no

desenvolvimento de projetos que envolvam o sistema de tratamento testado.

A ARD tratada através da combinação das tecnologias LBF's (QUELUZ, 2016) e reatores de desinfecção solar-SODIS (QUELUZ & SÁNCHEZ-ROMÁN, 2014) apresentou qualidade necessária para uso na irrigação, considerando os parâmetros pH, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais, a ARD atingiu a qualidade recomendada pela FAO para reúso na agricultura irrigada. Segundo a classificação proposta por Bucks, Nakayama e Gilbert (1979), a ARD tratada apresentou risco baixo a moderado de entupimento de gotejadores. Assim, não foram observadas restrições quanto ao método/sistema de irrigação a ser adotado pelo produtor. Além disso, após passar pelo sistema de tratamento testado a ARD apresenta potencial fertilizante, podendo disponibilizar para produção de hortaliças: $536,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de nitrogênio; $157,68 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de fósforo e $504,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de potássio. Portanto, o sistema de tratamento de água residuária para fins de reúso agrícola proposto neste estudo apresenta-se uma solução viável para o tratamento de ARD em comunidades rurais e populações tradicionais.

REFERÊNCIAS

ABO-GHOBAR, H. M. Influence of irrigation water quality on soil infiltration. **Irrigation Science**, [S.l.], v. 14, n. 1, p.15-19, set. 1993. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00195001>.

ABREU, S. B. **Regulamentação sobre reúso de água e efluente sanitário tratado no Brasil**. Belo Horizonte: PDF, 2017. 43 slides, color. Palestra. Disponível em: <http://www.resag.org.br/congressoresag2017/anais/extranet/uploads/Palestra/sergio_o_brasil_abreu_1513878355.pdf>. Acesso em: 02 maio 2019.

ACRA, A. *et al.* **Water disinfection by solar radiation: assessment and application**. Ottawa, Canada: International Development Research Centre-IDRC, 1989. 75 p. Technical study. Disponível em: <<https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/5093/IDL-5093.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 maio 2019.

ACRA, A.; RAFFOUL, Z.; KARAHAGOPIAN, Y. **Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions: guidelines for household application in Developing Countries**. Beirut: Unicef, 1984. Disponível em: <<https://www.ircwash.org/resources/solar-disinfection-drinking-water-and-oral-rehydration-solutions-guidelines-fo-household>>. Acesso em: 02 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília-DF: Agência Nacional de Águas, 2018. 72 p. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/>>. Acesso em: 08 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS -ANA; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - 2014: relatório síntese**. Brasília - DF: Agência Nacional de Águas, 2016. 33 p. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Atlas irrigação: uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília-DF: Agência Nacional de Águas, 2017. 86 p. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrigacao-UsodaAguanaAgricaturalIrigada.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA-ANVISA. Aprova o Regulamento Técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos. **Resolução-RDC Nº 12, de 02 de janeiro de 2001**. Brasília, 2001. Disponível em:<http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RDC_12_2001.pdf/15ffddf6-3767-4527-bfac-740a0400829b>. Acesso em: 05 maio 2019.

ALMEIDA, O. Á. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. Recurso eletrônico. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/875385/qualidade-da-agua-de-irrigacao>>. Acesso em: 03 maio 2019.

ALMEIDA, P. G. S. **Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de**

reatores UASB, com ênfase na nitrificação. 2007. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/286M.PDF>>. Acesso em: 01 jun. 2019

ALVES, L. R.; REIS, A. R.; GRATÃO, P. L. Heavy metals in agricultural soils: From plants to our daily life. **Científica**, Jaboticabal, v. 44, n. 3, p.346-361, 18 jul. 2016. FUNEP. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2016v44n3p346-361>.

ALVES, R. M. M.; SEGOVIA, J. F. O. **Planejando a instalação de hortas.** Macapá: Embrapa Amapá, 2011. 20 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/70683/1/7-Planejando-a-Instalacao-de-Hortas.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2019.

ALVES, T. R. **Eficiência de um sistema de desinfecção solar de águas residuárias domésticas com adição de diferentes doses de peróxido de hidrogênio.** 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Agronomia, Irrigação e Drenagem, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** Washington DC, 22 th. ed., 2012.

ANDRADE, C. L. T.; BRITO, R. A. L. **Métodos de irrigação.** 2019. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_16820051120.html>. Acesso em: 02 maio 2019.

AQUA LIGHTTECH LIMITED. **How does UV light destroy microorganisms.** 2019. Disponível em: <<http://aqualighttech.com/UV.asp?id=310>>. Acesso em: 03 maio 2019.

ARAUJO, C. A. M. **Caracterização da associação dos pequenos agricultores no contexto do projeto Cinturão Verde de Ilha Solteira-SP.** 2005. 237 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geografia área de Concentração: Desenvolvimento Regional e Planejamento Ambiental, Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/92848>>. Acesso em: 05 maio 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13939:** 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. **NBR 7229:** projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9649:** Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

AYRES, R.M.; MARA, D.D. **Analysis of Wastewater for Use in Agriculture: A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques.** Geneva: World Health Organization (WHO), 1996.

AYRES, R. M. *et al.* Comparison of techniques for the enumeration of human parasitic helminth eggs in treated wastewater. **Environmental Technology**, London, UK, v. 12, n. 1, p.617-623, 1991. Print ISSN: 0959-3330 Online ISSN: 1479-487X.

AYRES, R.S; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture** (Revised). Rome. FAO: Irrigation and Drainage Paper nº 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.186p.

BARROSO, L. B.; WOLFF, D. B. Radiação ultravioleta para desinfecção de água. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p.1-13, 2009. Ciências Naturais e Tecnológicas. Disponível em: <<https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/1250>>. Acesso em: 03 maio 2019.

BASTOS, R. K. X. *et al.* Wastewater irrigation of salad crops: further evidence for the evaluation of the WHO guidelines. **Water Science and Technology**, [S.I.], v. 57, n. 8, p.1213-1219, abr. 2008. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2008.244>.

BECERRA-CASTRO, C. *et al.* Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. **Environment International**, [S.I.], v. 75, p.117-135, fev. 2015. Elsevier BV.

BERNEY, M. *et al.* Efficacy of solar disinfection of Escherichia coli, Shigella flexneri, Salmonella Typhimurium and Vibrio cholerae. **Journal of Applied Microbiology**, [S.I.], v. 101, n. 4, p.828-836, out. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02983.x>.

BORGHETTI, J. R. *et al* (Ed.). **Agricultura irrigada sustentável no Brasil: identificação de áreas prioritárias**. Brasília: Organização das Nações Unidas Para A Alimentação e A Agricultura, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i7251o.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2019.

BOSSHARD, F. *et al.* Solar disinfection (SODIS) and subsequent dark storage of Salmonella typhimurium and Shigella flexneri monitored by flow cytometry. **Microbiology**, [S.I.], v. 155, n. 4, p.1310-1317, 1 abr. 2009. Microbiology Society. <http://dx.doi.org/10.1099/mic.0.024794-0>.

BOYLE, M. *et al.* Bactericidal Effect of Solar Water Disinfection under Real Sunlight Conditions. **Applied and Environmental Microbiology**, [S.I.], v. 74, n. 10, p.2997-3001, 21 mar. 2008. American Society for Microbiology. <http://dx.doi.org/10.1128/aem.02415-07>.

BRAGA, M. B.; LIMA, C. E. P. (Ed.). **Reúso de água na agricultura**. Brasília-DF: Embrapa, 2014. 200 p.

BRASIL. **Decreto nº 6.040, de 7 de fevereiro de 2007**, de 07 de fevereiro de 2007. Institui a política nacional de desenvolvimento sustentável dos povos e comunidades tradicionais. Brasília, DF: Presidência da República, 2007b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/decreto/d6040.htm>. Acesso em: 04 maio 2019.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979,

8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2007a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm. Acesso em: 22 maio. 2019.

BRESSAN, D. F. **Água de reúso e seu efeito sobre parâmetros fisiológicos em manjeriço (*Ocimum basilicum* L.)**. 2015. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, Botucatu, 2015.

BUCKS, D.A.; NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, [S.l.], v. 2, n. 2, p.149-162, jun. 1979. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774\(79\)90028-3](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774(79)90028-3).

BURGOS, A. J.; LÓPEZ, J. S.; RODRÍGUEZ, P. U. **Trickling filters series: secondary treatments**. Coruña: Universidade da Coruña, 2015. Disponível em: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558166/Trickling+filters.pdf/1c2ef2b5-6f3b-326a-c33b-bea411572184>. Acesso em: 01 maio 2019.

CAVINATTO, A. S.; PAGANINI, W. S. Os microrganismos nas atividades de disposição de esgotos no solo: estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p.42-51, mar. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522007000100006>.

CHAUDHARY, D. S. *et al.* Biofilter in water and wastewater treatment. **Korean Journal of Chemical Engineering**, [S.l.], v. 20, n. 6, p.1054-1065, nov. 2003. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02706936>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Boletim Hortigranjeiro**. 12. ed. Brasília-DF: Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, 2018. Vol. 4 dezembro 2018. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/23659_b6df5ebeae16a216ce5658ff9b9a23d1. Acesso em: 03 maio 2019.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS-CNRH. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH no 54, de 28 de novembro de 2005. **Resolução nº 121, de 16 de dezembro de 2010**. Brasília, Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/reúso-de-agua-recursos-hidricos/1414-resolucao-n-121-de-16-de-dezembro-de-2010/file>. Acesso em: 05 maio 2019.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS-CNRH. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. **Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005**. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br/reúso-de-agua-recursos-hidricos/37-resolucao-n-54-de-28-de-novembro-de-2005/file>. Acesso em: 05 maio 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá

outras providências. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 05 maio 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Brasília, Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 05 maio 2019.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p.1-11, 2009. Disponível em: <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3393>>. Acesso em: 02 maio 2019.

DEPARTMENT OF WATER AND SANITATION IN DEVELOPING COUNTRIES-SANDEC (Switzerland). **Solar water disinfection: a guide for the application of SODIS**. Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2002. Disponível em: <https://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_materia/manual_e.pdf>. Acesso em: 05 maio 2019.

DEPARTMENT OF WATER AND SANITATION IN DEVELOPING COUNTRIES-SANDEC (Switzerland). **SODIS manual: guidance on solar water disinfection**. Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2016. Disponível em: <https://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_materia/sodismanual_2016.pdf>. Acesso em: 05 maio 2019.

ESTAÇÃO METEOROLOGICA LAGEADO. **Informações da Estação Meteorologica Automática**. 2019. Disponível em: <<http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.html>>. Acesso em: 05 maio 2019.

FISHER, M. B. *et al.* Speeding up solar disinfection (SODIS): effects of hydrogen peroxide, temperature, pH, and copper plus ascorbate on the photoinactivation of E. coli. **Journal of Water and Health**, [S.l.], v. 6, n. 1, p.35-51, nov. 2007. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wh.2007.005>.

FREITAS, C. A. S. *et al.* Efluente de esgoto doméstico tratado e reutilizado como fonte hídrica alternativa para a produção de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 17, p.727-734, 2013.

FUJIOKA, R.S.; YONEYAMA, B.S. Sunlight inactivation of human enteric viruses and fecal bacteria. **Water Science and Technology**, [S.l.], v. 46, n. 11-12, p.291-295, dez. 2002. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2002.0752>.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE-FUNASA. **Panorama do saneamento rural no Brasil**. Brasília - DF: Departamento de Engenharia de Saúde Pública- Funasa, 2017. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/panorama-do-saneamento-rural-no-brasil>>. Acesso em: 04 maio 2019.

GEERAERD, A.H.; HERREMANS, C.H.; VAN IMPE, J.F. Structural model requirements to describe microbial inactivation during a mild heat treatment. **International Journal of Food Microbiology**, [S.l.], v. 59, n. 3, p.185-209, set. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1605\(00\)00362-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1605(00)00362-7).

GOMES, A. G. **Filtros biológicos percoladores**. 2013. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/6384-noticias>>. Acesso em: 03 maio 2019.

GOMES, E. R. **Aplicação de água residuária e deficiência hídrica em espécies de interesse agrônomo**. 2016. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, Botucatu, 2016.

GONÇALVES, R. F. (coord.). **Desinfecção de Efluentes Sanitários**. Rio de Janeiro: Abes, 2003. 438 p. Projeto PROSAB. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabRicardo.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2019.

HEASELGRAVE, W.; KILVINGTON, S. The efficacy of simulated solar disinfection (SODIS) against *Ascaris*, *Giardia*, *Acanthamoeba*, *Naegleria*, *Entamoeba* and *Cryptosporidium*. **Acta Tropica**, [S.l.], v. 119, n. 2-3, p.138-143, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actatropica.2011.05.004>.

IMHOFF, K. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1966. Tradução Max Lothar Hess.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Projeção da População 2018 (2010-2060): Brasil população total - idades simples**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018 Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Projecao_da_Populacao/Projecao_da_Populacao_2018/projecoes_2018_populacao_2010_2060.xls>. Acesso em: 01 maio 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 1.10 - Densidade demográfica nos Censos Demográficos, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - 1872/2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Censo 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=10&uf=00>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Ontario, Canada: Academic Press Canada, 1983.

JARAMILLO, M. F.; RESTREPO, I. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. **Sustainability**, [S.l.], v. 9, n. 10, p.1734-1753, 11 out. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su9101734>.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 994 p.

KIPP & ZONEN B.V. **CMP3 Pyranometer**. 2019. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/Product/11/CMP3-Pyranometer#.XPhrBv5RfIU>>. Acesso em: 02 maio 2019.

KOWALSKI, W. J. *et al.* Mathematical modeling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. **Quantitative Microbiology**, [S.l.], v. 2, n. 3, p.249-270, 2000. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1013951313398>

LAMAS, F. M. **Desafios da agricultura moderna**. 2018. Embrapa Agropecuária Oeste. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agropecuaria-oeste/busca-de-noticias/-/noticia/32676228/artigo-os-desafios-da-agricultura-moderna>>. Acesso em: 01 maio 2019.

LECHEVALLIER, M. W; AU, K. K. **Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water**. London: IWA Publishing, 2004. 112 p. Published on behalf of the World Health Organization. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/42796>>. Acesso em: 04 maio 2019.

LEWANDOWSKI, Z.; BOLTZ, J.P. Biofilms in Water and Wastewater Treatment. **Treatise on Water Science**, [S.l.], p.529-570, 2011. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-444-53199-5.00095-6>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARQUES, M. V. A. *et al.* Potencial, economia de água e adubação com a aplicação de efluente do tratamento preliminar de esgoto doméstico na fertirrigação de capim-elefante. **Holos**, Natal, RN, v. 2, p.52-64, 29 ago. 2017. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2017.5612>.

MARTINS, M. C. *et al.* Salinidade e Sodicidade do Solo em Cultivo de Banana Prata Anã Fertirrigada com Água Residuária Sanitária Tratada. In: FEPEG-FÓRUM DE ENSINO, PESQUISA, EXTENSÃO E GESTÃO, 9., 2015, Montes Claros. **Anais [...]**. Montes Claros: Fepeg, 2015. p. 1 - 4. Disponível em: <<http://www.fepeg2015.unimontes.br/?q=publicacao-anais>>. Acesso em: 02 maio 2019.

MCGUIGAN, K.G. *et al.* Batch solar disinfection inactivates oocysts of *Cryptosporidium parvum* and cysts of *Giardia muris* in drinking water. **Journal of Applied Microbiology**, [S.l.], v. 101, n. 2, p.453-463, ago. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02935.x>.

MEDEIROS, R. C. *et al.* Utilização de rejeitos como meio filtrante em filtros biológicos percoladores. In: VIII Congresso brasileiro de gestão ambiental, 8., 2017, Campo Grande. **Anais [...]** Campo Grande: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2017. p. 1 - 4. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/IX-012.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2019.

MEDEIROS, S. S. *et al.* Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 9, n. 4, p.603-612, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662005000400026>. Acesso em: 06 maio 2019.

MELLER, H. S. **Avaliação De Um Filtro Biológico Percolado Com Meio De Suporte Plástico Corrugado**. 2009. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.

MONTES, C. R. *et al.* Irrigação com esgotos tratados: impactos no solo e aquíferos. In: PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO-PROSAB. **Reúso das águas de esgoto sanitário, inclusive desenvolvimento de tecnologias de tratamento para esse fim**. Recife: Prosab/finep, 2006. Cap. 5. p. 155-200. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Esgoto-Prosab_-_final.pdf>. Acesso em: 10 maio 2019

MORAES, E. C. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: PDF, 2002. Color. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf>. Acesso em: 01 maio 2019.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review. **Irrigation Science**, [S.l.], v. 12, n. 4, p.187-192, dez. 1991. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00190522>.

NASCIMENTO, J. S. *et al.* Avaliação do crescimento, desenvolvimento e produção do algodão irrigado com água de esgotos sanitários tratados. **Agropecuária Científica no Semiárido**: Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Campina Grande, v. 2, n. 14, p.331-338, 2018. Disponível em: <<http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/1052>>. Acesso em: 02 maio 2019.

NASCIMENTO, M. C. P. **Filtro Biológico Percolador de pequena altura de meio suporte aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator UASB**. 2001. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/74M.PDF>>. Acesso em: 02 maio 2019.

NATURAL RESOURCES CANADA-NRCAN. **The Electromagnetic Spectrum**. 2015. Disponível em: <<https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/14623>>. Acesso em: 03 maio 2019.

OLIVEIRA, E. L. (Coordenador.). **Manual de Utilização de Águas Residuárias em Irrigação**. Botucatu: Fepaf-fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2012. 120 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS-ONU. **Objetivo 6. Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/ods6/>>. Acesso em: 06 maio 2019.

PEACOCK, C.; MILLER, G.; MARTIN, M. **Irrigation Water Quality Problems**. Disponível em: <<https://content.ces.ncsu.edu/irrigation-water-quality-problems>>. Acesso em: 01 abr. 2012.

PEREIRA JÚNIOR, J. d. S. **Recursos Hídricos: Conceituação, disponibilidade e usos**. Brasília-DF: Câmara dos Deputados, 2004. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notas-tecnicas/publicacoes-da-consultoria-legislativa/areas-da-conle/tema14/2004_2687.pdf>. Acesso em: 01 maio 2019.

PEREIRA, L. A. *et al.* Avaliação de tratamento simplificado da água de cisterna: desinfecção solar (SODIS) para consumo humano. In: 9º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 9., 2014, Feira de Santana. **Anais [...]**. Feira de Santana, 2014. p. 1 - 6. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/107132/1/Lucio.pdf>>. Acesso em: 04 maio 2019.

PESCOD, M. B. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992. FAO Irrigation and Drainage Paper-Nº 47. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/T0551E/t0551e00.htm#Contents>>. Acesso em: 02 maio 2019.

PINTO, M. C. K. *et al.* Contaminação das águas subterrâneas por nitrogênio devido à irrigação com efluente do tratamento de esgoto. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p.270-281, 11 jul. 2013. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n2p270>.

PLETSCH, T. A. **Irrigação de milho por sulcos com efluente de esgoto doméstico tratado**. 2012. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de Botucatu, Botucatu, 2012.

QUELUZ, J. G. T. **Eficiência de alagados construídos para o tratamento de águas residuárias com baixas cargas orgânicas**. 2016. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, Botucatu, 2016.

QUELUZ, J. G. T. **Estudo da eficiência da desinfecção solar de águas residuárias domésticas em reatores de diferentes colorações**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Agronomia (irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, Botucatu, 2013.

QUELUZ, J. G. T.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. Efficiency of domestic wastewater solar disinfection in reactors with different colors. **Water Utility Journal**, [S.l.], v. 35, n. 7, p.35-44, 2014.

REBOUÇAS, J. R. L. *et al.* Crescimento do Feijão-caupi irrigado com água residuária de esgoto doméstico tratado. **Revista Caatinga**, Mossoró-RN, v. 23, n. 1, p.97-102, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/1506>>. Acesso em: 01 maio 2019.

RODRIGUES, R. A. S. **Introdução ao estudo da oleicultura**. São Paulo: Editora e Distribuidora Educacional, 2019.

ROSATO, M. M. *et al.* Quantificação dos efluentes domésticos produzidos em uma área rural (Cinturão verde, Ilha Solteira-SP). In: XXI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP – SÃO JOSÉ DO RIO PRETO, 21., 2009, São José do Rio Preto. **Anais** [...]. São José do Rio Preto: Ibilce-unesp, 2009. p. 1 - 7. Disponível em: <http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/efluente_cinturao_cic2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2019.

SALES, M. A. L.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. Desenvolvimento da cultura e presença de *E. coli* na salsa irrigada com água residuária tratada por radiação solar. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 2, p.336-351, 27 jun. 2019. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2019v24n2p336-351>.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. *et al.* Domestic wastewater disinfection using solar radiation for agricultural reuse. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 1, p.65-71, 2007

SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Teores de nutrientes na alface irrigada com água residuária aplicada por sistemas de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p.45-57, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30095.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2019.

SANTOS, A. S. P. *et al.* Estimativa da capacidade disponível de reúso de efluentes na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul. In: III SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO RIO PARAÍBA DO SUL, 3., 2018, Juiz de Fora. **Anais** [...]. Juiz de Fora: III-SRHPS, 2018. p. 94 - 103. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/srhps/files/2018/09/Anais-III-SRHPS.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2019.

SHAKIR, E.; ZAHRAW, Z.; AL-OBAIDY, A. H. M. j. Environmental and health risks associated with reuse of wastewater for irrigation. **Egyptian Journal of Petroleum**, [S.l.], v. 26, n. 1, p.95-102, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.01.003>.

SILVA, P. F. *et al.* Obstruction and uniformity in drip irrigation systems by applying treated wastewater. **Revista Ceres**, [S.l.], v. 64, n. 4, p.344-350, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201764040002>.

SOLOMON, C. *et al.* **Trickling Filters: Achieving Nitrification**. Morgantown, Wv: The National Small Flows Clearinghouse, 1998. Disponível em: <http://www.nesc.wvu.edu/pdf/WW/publications/eti/TF_tech.pdf>. Acesso em: 02 maio 2019.

SOMMER, B. *et al.* SODIS: An emerging water treatment process. **Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua**, Si, v. 46, n. 3, p.127-137, 1997.

SOUZA, N. C. de *et al.* Produtividade da mamona irrigada com esgoto doméstico tratado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, p.478-484, maio 2010. FAPUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662010000500004>.

TELLES, D. D' A.; COSTA, R. P. (Coord.). **Reúso da Água: Conceitos, teorias e práticas**. 2. ed. Sao Paulo: Blucher, 2010. 408 p.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 2017. Disponível em: <www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=74329>. Acesso em: 01 maio 2019.

TRATA BRASIL. **O que é saneamento?** Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/o-que-e-saneamento>>. Acesso em: 05 maio 2019.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). 2017. The United Nations World Water Development Report 2017. **Wastewater: The Untapped Resource**. Paris, UNESCO.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-U.S.EPA. Municipal Wastewater, Sewage Sludge, and Agriculture. In: United States Environmental Protection Agency. **Use of Reclaimed Water and sludge in Food crop production**. Washington, D.C., EUA: Environmental Protection Agency, 1996. Cap. 2. p. 17-45. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/npdes/pubs/mstr-ch2.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2019.

VIVAR, M. *et al.* Separating the UV and thermal components during real-time solar disinfection experiments: The effect of temperature. **Solar Energy**, [S.l.], v. 146, p.334-341, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.053>.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1991. Vol.1.

VON SPERLING, M.; CHENICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. [S.l.]: IWA Publishing, 2005. DESA-Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

WARD, H. M. IV. Further experiments on the action of light on Bacillus anthracis. **Proceedings of the Royal Society of London**, [S.l.], v. 53, n. 321-325, p.23-44, jan. 1893. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rspl.1893.0005>.

WEGELIN, M. *et al.* Solar water disinfection: Scope of the process and analysis of radiation experiments. **Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua**, [S.l.], v. 43, n. 3, p.154-169, 1994.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Wastewater use in agriculture**. 2. ed. Switzerland: Who Library Cataloguing, 2006.

WYCKOMAR UV PURIFICATION SYSTEMS. **How Can "Light" Kill Bacteria?** 2018. Wyckomar Inc. Disponível em: <<http://www.wyckomaruv.com/UVTechnology.html>>. Acesso em: 04 maio 2019.

YOON, C. G.; KWUN, S. K.; HAM, J. H. Effects of treated sewage irrigation on paddy rice culture and its soil. **Irrigation and Drainage**, [S.l.], v. 50, n. 3, p.227-236, 2001. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ird.27>.