

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM NATURAL DO LODO DE ETA EM ESTUFA PILOTO

\* Matheus Marques Simões<sup>1</sup>  
Luciano Farias de Novaes<sup>1</sup>  
Gustavo Almeida Frata<sup>1</sup>

## OBTAINING PARAMETERS IN NATURAL SLUDGE DRYING SYSTEM DIMENSIONING WST USING A PILOT GREEN HOUSE

Recibido el 23 de febrero de 2021. Aceptado el 25 de octubre de 2021

### Abstract

*Sludge volume reductions techniques at water treatment stations, both natural and mechanized are being developed and improved in Brazil and many other countries. Concerning to that, this study sought to determine and evaluate parameters to WTS sludge natural drying in a pilot scale greenhouse already installed in an WTS in the state of Sao Paulo. This drying experiment was conducted in a different condition from the ones installed and studied so far in the same treatment unit, therefore it was made a structural modification for the existing pilot greenhouse that included closing its laterals in order to bring internal temperature to heighten. The total amount of solids obtained in a period of 76 days natural drying experiment at greenhouses were 82.20%, 74.40% and 50.30% respectively at layers of 15 cm., 30cm., and 60cm. The 40cm. sludge layer height was the one that needed the least drying area, this is, although the experiments showed that the 15cm. layers obtained better drying percentage (less time) by using this height requires on the other hand larger areas. And larger greenhouses structures. To consider a 90% range of sludge total solids, the Greenhouse of Natural Drying (after changings) was impaired. Although the temperature of the internal air had increased, it was not predicted a device for its recirculation and in this way the closed sides greenhouse took 123 days to perform the drying while the opened sides greenhouse took 111 days.*

**Keywords:** basic sanitation, drying methods, greenhouse of natural drying, solar energy drying, WTS residues.

<sup>1</sup>Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Brasil.

\* Autor Correspondal: Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias – Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Campos Ribeirão Preto. Av. Costábile Romano, 2201 – Nova Ribeirânia, Ribeirão Preto, São Paulo/Brasil. Cep:14096-900. Email: [matheus.simoese@educacao.mg.gov.br](mailto:matheus.simoese@educacao.mg.gov.br)

## Resumo

Técnicas de redução do volume de lodo das Estações de Tratamento de Água (ETA), tanto naturais quanto mecanizadas, estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas no Brasil e em diversos países. Nesse sentido, o presente estudo teve objetivo de determinar e avaliar parâmetros para a secagem natural de lodo de ETA em uma estufa de escala piloto instalada em uma ETA situada no estado de São Paulo. O experimento de secagem foi conduzido com condições de secagem diferentes das já estudadas anteriormente na mesma unidade de tratamento, para tanto, foi realizado na estufa existente modificações na sua estrutura, incluindo o fechamento das suas laterais visando aumentar a temperatura interna. A concentração de sólidos totais obtida no experimento para 76 dias de secagem natural em estufa, foi de 87.20%, 74.40% e 50.30% respectivamente para as camadas de 15 cm, 30 cm e 60 cm. A altura da camada de lodo que representou a menor área necessária para secagem foi de 40 cm, ou seja, embora os experimentos mostraram que a camada de 15 cm apresentava melhores taxas de secagem (menor tempo de secagem), ao utilizar esta altura, requer maiores áreas e maiores estruturas de estufas. Ao considerar um alcance de 90% de sólidos totais no lodo, a eficiência da Estufa de Secagem Natural (após modificações) foi prejudicada. Embora a temperatura do ar interno tenha aumentado, não foi previsto um dispositivo para recirculação dele. Com isso, a estufa de laterais fechadas levou 123 dias para realizar a secagem e a de laterais abertas 111 dias.

**Palavras chave:** estufa de secagem natural, métodos de secagem, resíduos de ETA, saneamento básico, secagem por energia solar.

## Introdução

A atual crise sanitária causada pela Covid-19 evidenciou com muita clareza a vulnerabilidade das pessoas que não dispõem de acesso a água potável, uma vez que, os órgãos de saúde pública tanto no âmbito nacional como internacional, recomendam que se lave as mãos com frequência para evitar contaminação por corona vírus. Diante de recomendações como estas, depara-se com uma triste realidade no Brasil, uma vez que há por volta de 35 milhões de brasileiros sem abastecimento com água tratada em suas residências (Agência Senado, 2020).

Ter acesso ao saneamento básico é fundamental para a garantia da saúde e dignidade da pessoa humana. A ausência ou deficiência no fornecimento em qualquer um dos quatro serviços, que unidos definem o termo saneamento básico, representará riscos à população. Por exemplo, déficits no sistema de tratamento e de abastecimento com água potável, incita o consumo de água potencialmente contaminada por poluentes ou patógenos e a disposição inadequada de resíduos sólidos, podem contaminar o solo, as águas subterrâneas e superficiais comprometendo a saúde pública (SIMA, 2020).

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde – FUNASA (2017), investir em saneamento impacta indiretamente na saúde da pessoa humana. A fundação afirma que, o fornecimento de *água* com qualidade e contínuo para o consumo humano asseguram a redução de doenças como diarreias, cólera, hepatites, conjuntivites e malária. Similarmente, a promoção da coleta regular, acondicionamento e destino final aos resíduos sólidos domiciliares diminuirá a incidência de casos de peste, febre amarela, dengue, toxoplasmose, leishmaniose, leptospirose, cólera e febre tifoide.

Há estimativa de geração de 3 mil toneladas diárias de lodo de ETA e ETE em 2020 pelos 76 municípios presentes na bacia (PCJ, 2011). Nesta mesma bacia, foram identificados 103 estações de tratamento de água, sendo que 98 estavam em operação e, portanto, gerando resíduos. Das estações em operação, foi constatado que apenas 28% possuem algum destino para o seu lodo gerado, como secagem e envio para aterros; 35% dispõem diretamente seus resíduos nos corpos hídricos, 19% não responderam à pergunta e 18% ainda não há destino adequado, mas possuem projetos ou previsão de adequação (PCJ, 2018).

A definição da tecnologia para tratar o lodo de ETA, dependerá de fatores como área necessária e disponível para implantação, custos com a área, distância da estação ao local de disposição final, condições climáticas, custo dos equipamentos, custos operacionais, necessidade de mão de obra qualificada, necessidade de condicionamento do lodo, dentre outros fatores (PROSAB, 1999).

A secagem natural já é conhecida a muitos anos, entretanto, para algumas tecnologias, principalmente para secagem em estufa, a técnica carece de parâmetros relacionados a eficiência. E, uma das tecnologias que podem ser empregadas para secar lodos, é a Secagem Natural de Lodo em Estufa (Sludge Natural Drying in Greenhouse).

Di Bernardo *et al.* (2012), lembra que, apesar do baixo consumo energético das várias técnicas de secagem natural, estas, não estão totalmente desenvolvidas, por falta parâmetros de projeto e operação.

A secagem em estufa é um processo de secagem de lodo utilizando plantas solares, nas quais o objetivo é promover a aceleração na taxa de evaporação da água pelo efeito estufa artificial conseguido através da planta solar (estufa). Com o aumento da umidade do ar interno pela evaporação, pode ser que seja necessário evitar o equilíbrio da pressão de vapor entre a água presente no lodo e água presente no ar interno, por ventilação controlada do ar interno. A tecnologia de secagem em estufa em contraste com secadores térmicos convencionais, é caracterizada por uma demanda muito baixa de energia (Collard *et al.*, 2017).

Resultados experimentais para a desidratação de lodo em estufa, foram determinados nas condições típicas do Mediterrâneo, com alta radiação solar anual e elevadas temperaturas para a região do norte da Grécia. Estes resultados provaram a eficiência da tecnologia para a região em estudo, pela redução verificada de umidade presente no lodo durante o verão (de 85% para 6%) e no outono (de 85% para 10%) utilizando com uma planta solar (secagem em estufa) equipada com um aquecedor solar de recirculação de água (Mathioudakis *et al.*, 2009).

Frata (2019), sugeriu uma metodologia para determinar a altura de lodo que represente a menor área necessária em função da geração de lodo, exposto a secagem por energia solar em uma

estufa piloto. O pesquisador determinou a altura de camada (ideal) de lodo a ser disposta em leiras dentro da estufa que demandasse a menor área de exposição a secagem e, ao mesmo tempo realizasse a secagem do material com vista a redução de volume do lodo gerado pela ETA. O referido autor, alcançou em seu experimento um teor de Sólidos Totais - ST igual a 90% em 97 dias para uma altura de camada (ideal) de lodo igual a 35 cm utilizando uma área de secagem total de 743 m<sup>2</sup>.

Wang *et al.* (2019), propuseram um processo de secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos, no qual o lodo é disposto na forma de finas camadas em câmaras do tipo sanduíche. Os pesquisadores otimizaram a taxa de secagem pelo ajuste das variáveis como espessura de leito de lodo e intensidade solar. Foi obtido como resultado no experimento, uma espessura de camada de lodo igual a 5 cm com sendo a mais adequada para a secagem rápida, reduzindo o teor de água no lodo de 79% para 5% em apenas 11 horas de secagem.

Shao *et al.* (2015), realizaram um experimento de secagem natural de lodo desidratado com a incorporação de palha de arroz no material, utilizando uma caixa quadrada de madeira sem cobertura. O desígnio dos pesquisadores foi avaliar a velocidade de secagem devido inclusão no lodo, com a palha de arroz na proporção mássica de 15:1. Então a mistura foi submetida a secagem solar em uma espessura de camada de lodo/palha igual a 30 cm. Os referidos autores verificaram que a umidade presente na mistura, reduziu de 75% para 45% nos 23 dias de exposição a secagem.

Kurt *et al.* (2015), informam que a secagem térmica é um método capaz de concentrar em 90% o conteúdo de sólidos presentes no lodo. Bennamoun *et al.* (2013), informam que o processo de secagem de lodo é complicado, depende de vários parâmetros como métodos secagem e condições de funcionamento e, que as taxas de secagem diminuem com o decorrer da secagem. De acordo com os autores, na secagem solar diferentemente dos métodos de secagem convencionais, a taxa de secagem é afetada pelas condições climáticas, aumentando durante as altas radiações e diminuindo em condições desfavoráveis.

Salihoglu *et al.* (2007), investigaram uma solução para a produção de pelo menos 27000 toneladas de lama que serão geradas por duas estações de tratamento de efluentes da cidade de Bursa na Turquia. O estudo foi conduzido em instalações de secagem cobertas e não cobertas. Os referidos autores, verificaram que a secagem realizada com a cobertura, proporcionou o efeito estufa em um volume controlado e permitiu uma temperatura superior do que a exterior. Ainda, foi constatado que sistema fechado resultou em níveis mais elevados de sólidos secos presente na lama e, que o desempenho da secagem no sistema aberto foi prejudicado pela precipitação e parou quando a temperatura e velocidade dos ventos eram baixas.

Ameri *et al.* (2018), estudaram a secagem solar utilizando equipamentos (secadores diretos e indiretos) que convertem a energia solar em energia térmica, para realizar a secagem de lodo proveniente de estações de tratamento de águas residuais da Argélia. A velocidade de secagem do lodo, em ambos os equipamentos mostrou que a umidade diminuiu rapidamente nos primeiros tempos de secagem, o que significou uma elevada taxa ou velocidade de secagem observada. E, após passado um período de tempo, a umidade reduziu cada vez mais lentamente.

Portanto, esta pesquisa vem com desígnio de contribuir com o desenvolvimento, aperfeiçoamento e redução de custos das tecnologias voltadas ao gerenciamento dos resíduos de ETAs. Nesse sentido, objetivou-se determinar e avaliar parâmetros para a secagem natural de lodo de ETA, com o intuito principal de diminuir o tempo necessário de permanência deste na planta de secagem. Deste modo, para determinar os parâmetros de dimensionamento da estufa em condições particulares de secagem, foram realizadas modificações na estufa de escala piloto, a qual está instalada em uma Estação de Tratamento de Água - ETA localizada no interior do estado de São Paulo. Espera-se (hipótese) que essas modificações resultem em melhoria de eficiência. As alturas de lodo testadas foram de 15 cm, 30 cm e 60 cm para o alcance das concentrações de sólidos totais no lodo em função do tempo. De posse dos resultados, foi determinado a altura de camada que demandou a menor área de exposição, necessária para realizar a secagem do lodo gerado pela ETA.

## Material e métodos

### Caracterização da ETA em estudo e Readequação da estufa piloto para realizar os testes de secagem do lodo da unidade em estudo

A caracterização da Estação de Tratamento de Água – ETA em estudo, foi realizada mediante diálogos com o responsável técnico pelo processo de tratamento e com os operadores de processo, durante as visitas de campo realizadas, reuniões, ligações telefônicas e por mensagens via aplicativo WhatsApp. Demais informações foram conseguidas através de pesquisas na internet, documentos fornecidos pela empresa e literatura.

Para obtenção dos parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural do lodo desaguado de ETA em estufa, foi modificada uma estufa piloto já existente nas imediações da ETA em estudo para conduzir os ensaios de secagem com intuito de possibilitar a realização da secagem do lodo desaguado em centrífuga, em uma condição particular (diferentes condições de secagem) e, avaliar as taxas de secagem obtidas. Portanto, uma das principais diferenças do presente estudo quando comparado com o estudo do Frata (2019), consistiu em fechar parte das paredes laterais da estufa, sendo esperado (hipótese) que ao fechá-las a taxa de secagem aumentasse pelo aumento da temperatura interna.

As características, diferenças e semelhanças da estufa piloto existente nas imediações da ETA utilizada por Frata (2019), com a estufa piloto utilizada no presente estudo (após realizada as alterações/modificações), estão descritas no Quadro 1 e apresentadas conforme Figura 1.

Foi mantido (após as modificações na estufa existente) uma pequena abertura superior na frente e fundo da estufa. Já as laterais da estufa permaneceram isentas de abertura na parte superior que fica em contato com o telhado, conforme ilustrado pelas Figuras 3 e 4.

As aberturas na parte superior da frente e fundo da estufa, juntamente com as aberturas laterais próximas ao solo, permitem que o ar interno da estufa saia e “carregue” a umidade presente no interior desta. Portanto, o percentual de abertura da frente e fundo da estufa foi mantido e corresponde a 3,3% da área total relativa à frente da estufa ou de fundo. Já com relação as paredes laterais, as modificações efetuadas na estufa consistiram em fechar 83.3% de suas laterais (manteve-se um vão livre de 50 cm próximo ao solo o que corresponde a 16.7% da área total de uma das laterais).

**Quadro 1.** Principais características da estufa utilizada por Frata (2019), e da estufa readequada no presente estudo.

PARÂMETROS	FRATA (2019)	AUTOR (2020)
Frente da estufa	Boa parte fechada com placas transparentes.	Boa parte fechada com placas transparentes
Fundo da estufa	Boa parte fechada com placas transparentes.	Boa parte fechada com placas transparentes.
Cobertura da estufa	Totalmente fechada com placas transparentes.	Totalmente fechada com placas transparentes.
Laterais da estufa	Totalmente aberta.	Boa parte fechada, apresentando apenas um vão livre de 50 cm de altura próximo ao solo, em todo o comprimento da estufa.
Geometria das leira/leitões	Leiras de secagem, com comprimento igual ao comprimento da estufa.	Leitões quadrados com lado externo igual a 2.13 metros
Material de construção das leira/leitões	Madeira.	Blocos de tijolos com reboco.
Pavimentação do solo	Concreto.	Concreto.
Revolvimento do Lodo	Sem revolvimento.	Sem revolvimento.
Comprimento Externo (m)	6.50	6.50
Largura Externa (m)	5.50	5.50
Altura (m)	3.0	3.0



a. Estufa Existente; b. Estufa Readequada

**Figura 1.** Estufa piloto que existia na ETA (a) e Estufa Piloto readequada (b) no presente estudo.

Fonte: Autor (2020)

As placas transparentes utilizadas para construção da estufa (cobertura do teto, frente, fundo e laterais), são constituídas pelo material policarbonato cristal “alveolar”, possuem uma resistência superior à do vidro de até 250 vezes e contam com uma espessura igual a 4mm. A transferência de luminosidade e calor das placas são similares as transferências do vidro canelado. Portanto, elas não refletem a luminosidade, permitindo uma excelente absorção de calor.

Apesar de haver árvores no entorno da estufa, o experimento foi realizado na ausência de regiões com sombreamento. Ainda, a estufa está instalada em uma Estação de Tratamento de Água - ETA localizada no interior do estado de São Paulo, com coordenadas geográficas para Longitude UTM: 752698.37m E e para Latitude UTM: 7536869.12m S.

#### Obtenção de parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural do lodo de ETA

#### **Obtenção dos Dados de Monitoramento da Temperatura e Umidade do ar Interno e Externo à Estufa Piloto e dos Dados e Gráficos de Monitoramento da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto**

Foram instalados dois medidores de registro simultâneo de temperatura e umidade do ar, um interno e outro externo à estufa do tipo Datalogger IMPAC IP-747RH. Este fornece o número de medições de ambas as variáveis com suas respectivas datas e horas e, registra os dados em sua memória interna. Em seguida, de posse dos resultados, foram calculados os valores médios da

temperatura e da umidade ao longo de todo o período experimental, tanto do ar interno quanto do ar externo.

A aquisição dos valores de concentração de Sólidos Totais – ST presentes nas amostras de lodo no decorrer dos dias de realização do experimento de secagem em estufa, foi conseguida utilizando uma balança determinadora de umidade (Medidor de Umidade ID200). A determinação da concentração de Sólidos Totais – ST, foi realizada semanalmente e os resultados coletados relativos ao desempenho de secagem ao longo dos dias (determinação da concentração de sólidos totais - ST) e em diferentes camadas, foram organizados e armazenados em forma de planilha digital. Sendo que, o experimento de secagem foi realizado em três leitos de geometria quadrada de lado igual a 2 metros e construídos em blocos de tijolos com reboco. As alturas testadas de lodo e dispostas dentro dos 3 leitos utilizados da estufa, foram estabelecidas em 60 cm, 30 cm e 15 cm.

De posse dos dados de determinação de Sólidos Totais – ST foi possível gerar os gráficos de monitoramento representativos do fenômeno de secagem analisado e, traçar curvas empregando como dados de entrada os valores de concentração em função do tempo de secagem em dia por meio do software Excel.

### **Aquisição das Taxas de Secagem e Equações Descritivas de cada um dos Experimentos de Secagem pelo Método da Linearização**

O recurso utilizado para determinar as taxas de secagem (variação da concentração de sólidos no lodo em função do tempo) e obter as equações matemáticas para cada um dos leitos experimentais nas condições analisadas; consistiu no uso do Excel como auxílio, que de posse das curvas obtidas e utilizando ferramentas próprias do Excel, foi efetuada a linearização (linhas de tendência – MÉTODO DA LINEARIZAÇÃO). Com isso obteve-se as equações lineares para cada camada de lodo, estas descrevem o comportamento da secagem em cada leito. E, de posse das equações obtidas, foi possível calcular os parâmetros relativos ao tempo de secagem natural em estufa requerido ou necessário, para atingir uma determinada concentração de sólidos no lodo, para cada altura de camada disposta nos leitos.

### **Determinação da Altura da Camada de Lodo a ser Disposta nos Leitos da Estufa Piloto para Secagem Natural**

Para determinar a altura (melhor viabilidade técnica/econômica) de camada de lodo a ser disposta na estufa que necessitará da menor área de secagem para “secar”, foi utilizada a metodologia proposta por Frata (2019). Assim, utilizando a metodologia, mas considerando as taxas obtidas neste estudo, foi possível obter as Equações 1 e 2.

$$t_s = \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{\text{equação da taxa de secagem}} \right)$$

**Equação (1)**

Sendo:

$t_s$ : Tempo necessário de secagem do Lodo [d];

$C_{FSTL}$ : Concentração final de sólidos totais no lodo (lodo “seco”) [%];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

Equação da taxa de secagem: Função da Altura da camada de lodo – h [m].

Com auxílio do software Excel foram alimentados na Equação 1, valores de altura da camada de lodo exposta a secagem natural (h), iniciando em 10 cm e finalizando em 60 cm, com acréscimos de 0.5 cm, obtendo com isso valores de tempos de secagem, para cada uma das alturas alimentadas. De maneira análoga, foram alimentados na Equação 2, valores de altura da camada de lodo exposta a secagem natural (h), iniciando em 10 cm e finalizando em 60 cm, com acréscimos de 0.5 cm, obtendo com isso valores de área de secagem necessária, para cada uma das alturas alimentadas.

$$A_{SL} = \left( \frac{Q_{\text{áb}} \cdot (4.89 \cdot D_{MC} + C_{SST\text{áb}})}{C_{ISTL} \cdot \rho_{LD} \cdot h \cdot 10} \right) \cdot \left( \frac{C_{FSTL} - C_{ISTL}}{\text{equação da taxa de secagem}} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo:

$A_{SL}$ : Área Total de secagem necessária [m<sup>2</sup>];

$Q_{\text{áb}}$ : Vazão de água bruta a ser tratada [m<sup>3</sup>/d];

$D_{MC}$ : Dosagem média de coagulante (a base de alumínio) [mg/L];

$C_{SST\text{áb}}$ : Concentração de sólidos suspensos totais na água bruta a ser tratada (Média ponderada considerando os 12 meses de 2018) [mg/L];

$C_{ISTL}$ : Concentração inicial de sólidos totais no lodo (lodo desaguado) [%];

$\rho_{LD}$ : Massa específica do lodo desaguado [kg/m<sup>3</sup>];

$C_{FSTL}$ : Concentração final de sólidos totais no lodo (lodo “seco”) [%].

Equação da taxa de secagem: Função da Altura da camada de lodo – h [m].

De posse dos resultados apresentados, referentes as áreas de secagem necessárias e aos tempos de secagem necessários, na medida em que se alterou a altura de camada de lodo; foi gerado um gráfico pelo Excel que, com base na curva apresentada pelo gráfico, foi possível verificar a altura de camada “ideal” que deve ser disposta nos leitos (pelo ponto de inflexão da curva), ou seja, aquela que necessitará da menor área de secagem para “secar” o lodo gerado pela ETA em estudo.

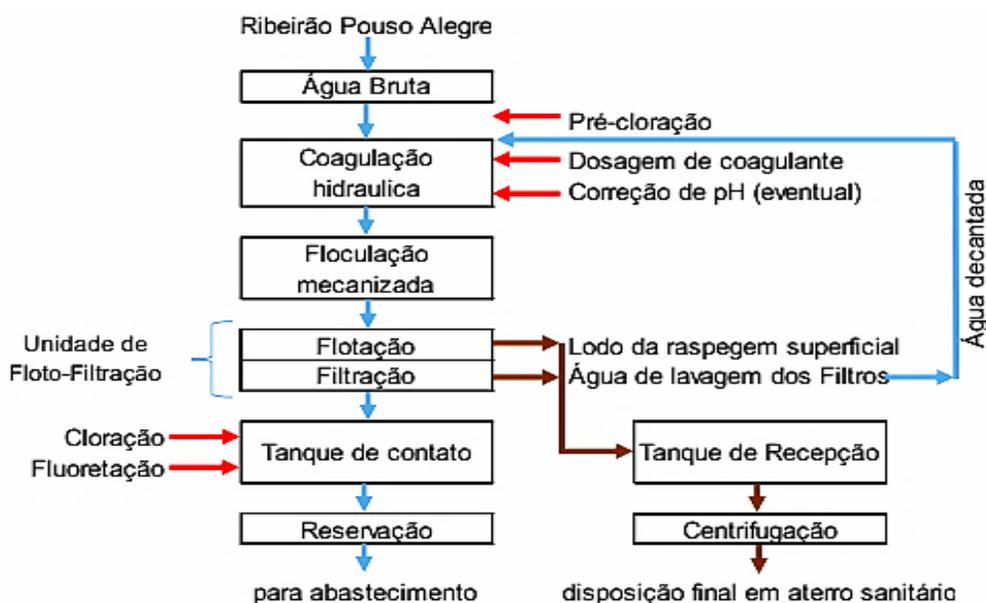
## Resultados

### Caracterização da ETA em estudo e Modificação da estufa piloto para realizar os testes de secagem do lodo da unidade em estudo

De acordo com informações prestadas pelos responsáveis do tratamento durante na Estação de Tratamento de Água (ETA) em estudo, atualmente a estação explora tanto mananciais superficiais quanto subterrâneos, com vista ao abastecimento público de água. Sendo que, o primeiro meio

de captação ocorre em um rio e o segundo meio de captação é feito através de um poço perfurado nas próprias dependências da estação. A ETA atualmente produz uma vazão de 600 m<sup>3</sup>/h de água, com um sistema de tratamento constituído com calha Parshall, 3 (três) câmaras de floculação e 3 (três) câmaras de flotofiltração.

As etapas do tratamento na ETA em estudo estão apresentadas na Figura 2, sendo: Etapa de dosagem de produtos químicos e coagulação hidráulica em Calha Parshall. Etapa de floculação mecanizada. Etapa de flotação com ar dissolvido e seguida de filtração na mesma unidade. Etapa de correção final do pH, Desinfecção com cloro gás e Fluoretação. Etapa de Reservação de água potável em um reservatório de 2.000 m<sup>3</sup>. Etapa de recuperação dos RETAs e desaguamento destes em uma centrífuga.



**Figura 2.** Fluxograma da ETA em estudo.

Fonte: Adaptado de Frata (2019)

A estufa após realizadas as modificações, está apresentada conforme Figuras 3 e 4. Ressalta-se que, o fechamento das laterais da estufa para determinação da concentração de Sólidos Totais no lodo, teve intuito de melhorar os valores de taxa de secagem do lodo (eficiência de secagem de lodo).



**Figura 3.** Leitos existentes na estufa piloto em estudo.

Fonte: Autor (2020)



**Figura 4.** Leitos existentes na estufa piloto em estudo.

Fonte: Autor (2020)

*Obtenção de parâmetros de dimensionamento do sistema de secagem natural do lodo de ETA*

**Obtenção dos Dados de Monitoramento da Temperatura e Umidade do ar Interno e Externo à Estufa Piloto e dos Dados e Gráficos de Monitoramento da Concentração de Sólidos Totais no Lodo Durante o Processo de Secagem Natural em Estufa Piloto**

De posse dos resultados das medições de temperatura interna e externa do ar e das medições de umidade interna e externa do ar, foi possível obter os valores da Temperatura e da Umidade do ar externo a estufa ao longo de todo o período experimental e, compará-los com aqueles obtidos por Frata (2019), conforme apresentado pela Tabela 1.

**Tabela 1.** Comparação entre os resultados obtidos no experimento com os de Frata (2019), relativos aos valores da temperatura média e umidade média do ar externo a estufa durante todo o período de secagem.

FRATA 2019		AUTOR 2020	
T <sub>MED.</sub> [°C]	U <sub>MED.</sub> [%]	T <sub>MED.</sub> [°C]	U <sub>MED.</sub> [%]
27.1	64.7	27.23	67.39

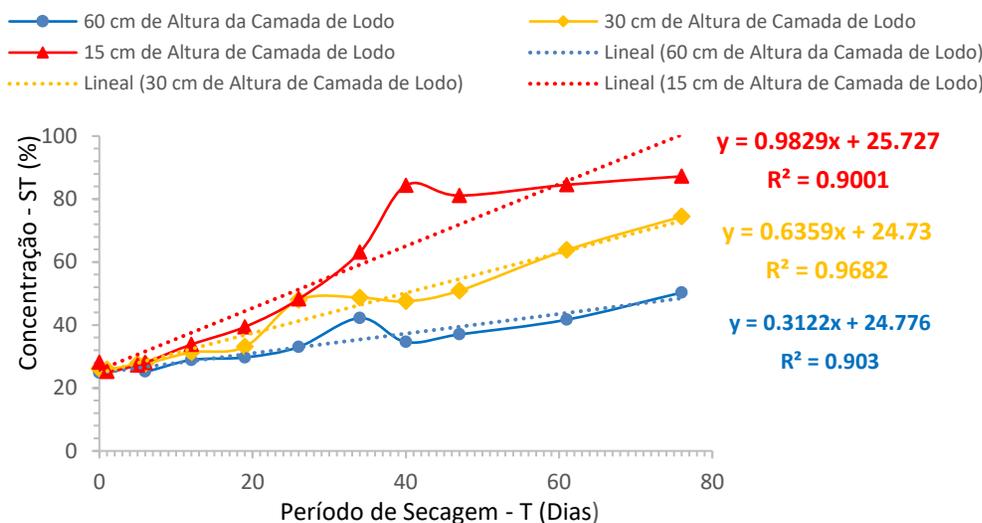
A comparação dos resultados obtidos para as medições de Temperatura e Umidade relativos ao ar interno a estufa com o trabalho de Frata (2019), não foi possível de ser realizada, uma vez que, no trabalho do autor citado, este não disponibilizou informações sobre o monitoramento dessas variáveis para o ar interno a estufa. Portanto, as condições climáticas em que se obteve os valores das taxas de secagem, foram respectivamente para valores de Temperatura média e Umidade média do ar interno a estufa de 29.54°C e 63.99% e, para valores de Temperatura média e Umidade média do ar externo a estufa de 27.23°C e 67.39%.

Com relação aos dados de monitoramento da concentração de Sólidos Totais – ST, o experimento foi cessado após verificado que não houve alteração relevante nos valores de concentração de sólidos totais no lodo (alteração de umidade), ou seja, no caso de estudo, após atingido os 76 dias de experimento. Desta forma, foi encontrado o limite de secagem em dias para as condições estudadas e, posteriormente, o lodo “seco” foi removido dos leitos manualmente.

Ainda, pelos dados obtidos foi possível verificar que concentração de ST presentes lodo que foi disposto em uma altura de camada de 15 cm, atingiu a concentração de 84.30% de sólidos em um tempo de 40 dias de exposição à secagem natural em estufa. E, logo na semana seguinte, a análise de concentração indicou que, ao invés do lodo continuar perdendo umidade, ele passou a absorver umidade. Também, de posse dos resultados foi possível apurar que, para a camada de altura igual a 60 cm, é inviável realizar a secagem, pois o tempo requerido para alcançar uma concentração de sólidos totais no lodo acima 60%, foi superior a 100 dias.

Enfim, a concentração de ST determinada para a 76 dias de secagem natural, foi de 87.20%, 74.40% e 50.30% respectivamente para as camadas de 15 cm, 30 cm e 60 cm. Portanto, o melhor resultado em relação ao tempo de secagem, foi alcançado pela camada de 15 cm.

De posse dos valores de ST em função do tempo de secagem para cada altura de camada de lodo, foi possível gerar os gráficos de monitoramento representativos do fenômeno de secagem analisado e, traçar curvas empregando como dados de entrada os valores de concentração em função do tempo de secagem para cada altura de camada de lodo, conforme apresentado pela Figura 5. Em síntese, o gráfico apresentado representou o fenômeno de secagem natural por energia solar efetuado na estufa piloto com 83.3% das laterais fechadas.



**Figura 5.** Equações e curvas representativas dos dados de concentração de sólidos totais - ST no lodo desaguado da ETA em estudo durante 76 dias de secagem natural em estufa piloto.

### Aquisição das Taxas de Secagem e Equações Descritivas de cada um dos Experimentos de Secagem pelo Método da Linearização

Segundo apresentado pela Figura 5, as equações trazidas foram conseguidas pela linearização das curvas, pois este foi o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais (linhas de tendência – MÉTODO DA LINEARIZAÇÃO), obtendo com isso as taxas de secagem e equações descritivas, conforme pela Tabela 2.

Além da aquisição de dados do processo de secagem natural do lodo de ETA necessários para dimensionar um sistema de secagem, que foi um dos pontos principais do estudo; outro principal ponto, foi comparar os resultados com aqueles antes obtidos por Frata (2019), pois, uma das

principais diferenças deste com o presente estudo foi efetuar a secagem natural do lodo em estufa com 83.3% das suas laterais fechadas, sendo esperado (hipótese) que ao fechá-las a taxa de secagem aumentasse pelo aumento da temperatura interna. Na Tabela 3 são apresentadas as taxas de secagem obtidas por Frata (2019) comparada com as taxas obtidas no presente trabalho.

**Tabela 2.** Equações descritivas do experimento de secagem e taxas de secagem referentes a cada modelo.

ALTURA DE CAMADA DE LODO (cm)	FUNÇÃO REPRESENTATIVA DA EXPERIMENTO DE SECAGEM	TEMPO DE SECAGEM (dia)	TAXA DE SECAGEM (%ST/DIA)
60	$C = 0.3122 T + 24.776$	76	0.31
30	$C = 0.6359 T + 24.730$	76	0.64
15	$C = 0.9829 T + 25.727$	76	0.98
15	$C = 1.3082 T + 21.136$	40	1.31

**Tabela 3.** Comparação entre os resultados obtidos (taxa de secagem) no experimento com os de Frata (2019), relativos a taxa de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem.

PARÂMETRO	ALTURA DE CAMADA (cm)	FRATA 2019	AUTOR 2020
Taxa (%ST/DIA)	15	-	0.98
Taxa (%ST/DIA)	10 ou 20	1.00	-
Taxa (%ST/DIA)	30	0.88	0.64
Taxa (%ST/DIA)	60	0.25	0.31

Com base nas taxas de secagem dispostas segundo Tabela 3, foi possível verificar para a altura de camada de 60 cm, um aumento de eficiência pelo aumento do valor da taxa para a referida camada, ao comparar os resultados obtidos com os de Frata (2019), o que representou uma maior velocidade de secagem nessa condição e, portanto, concebeu um tempo menor de exposição do lodo a secagem natural em estufa, considerando atingir uma mesma concentração final de sólidos totais.

Já para a altura de camada de 30 cm, verificou-se uma diminuição na eficiência, pois o valor alcançado para o parâmetro taxa de secagem foi menor quando comparado ao valor obtido por Frata (2019). E, por fim, comparando a altura de camada de 15 cm com a altura de camada de 20 cm estudada por Frata (2019), as taxas de secagem observadas foram equivalentes, mesmo sendo maior a altura de camada estudada por Frata.

Esse comportamento observado em ambos os casos, tanto naquele em que houve diminuição na eficiência, quanto naquele que a eficiência foi equivalente não era esperado.

Esperava-se que ocorresse uma contribuição na velocidade de secagem em estufa com 83.3% das suas laterais fechadas, se comparada a secagem realiza em estufa de laterais “abertas”, pois valores maiores de temperatura do ar interno favorecem a evaporação pelo aumento da energia de vibração das moléculas de água presentes no lodo e, assim como valores menores de umidade, também favorecem a evaporação da água presente no lodo, através da diminuição da resistência de escape das moléculas da fase líquida para a fase vapor.

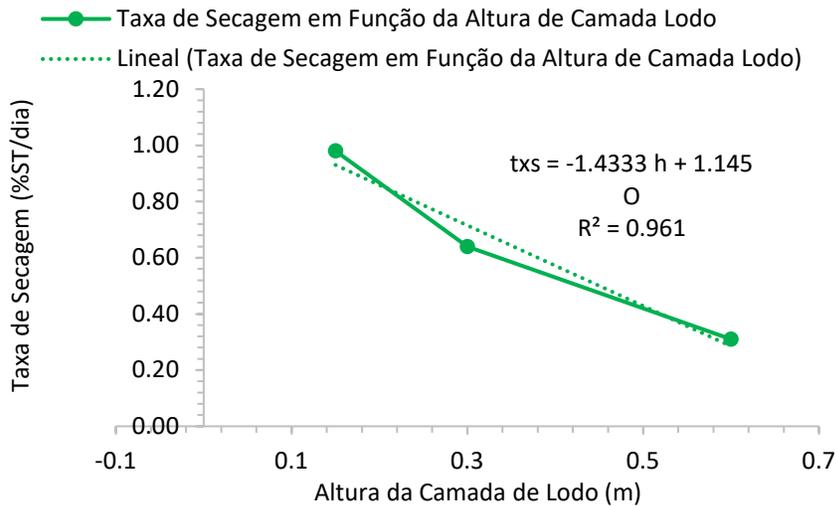
É possível que, o acréscimo obtido na taxa de secagem devido ao aumento da temperatura interna do ar dentro da estufa ocorrido pelo fechamento das laterais (o que contribui para o aumentar a velocidade de secagem) tenha sido compensado por um possível decréscimo na taxa de secagem devido a uma menor circulação do ar de dentro da estufa para fora dela, o que dificultou o escape da umidade de dentro da estufa, prejudicando assim a velocidade de secagem.

#### **Determinação da Altura da Camada de Lodo a ser Disposta nos Leitos da Estufa Piloto para Secagem Natural**

Através dos resultados apresentados foi possível afirmar que, a disposição de “finas” camadas de lodo nos leitos para secagem natural, requer um tempo menor para atingir uma concentração de ST, o que em primeira análise é positivo do ponto de vista técnico no projeto de estufas de secagem natural. Porém do ponto de técnico/econômico, para a disposição em “finas” camadas, há uma tendência de necessitar de grandes áreas disponíveis para realizar a secagem do lodo, aumentando os custos de construção da estufa, aquisição de área e aumento da mão de obra operacional.

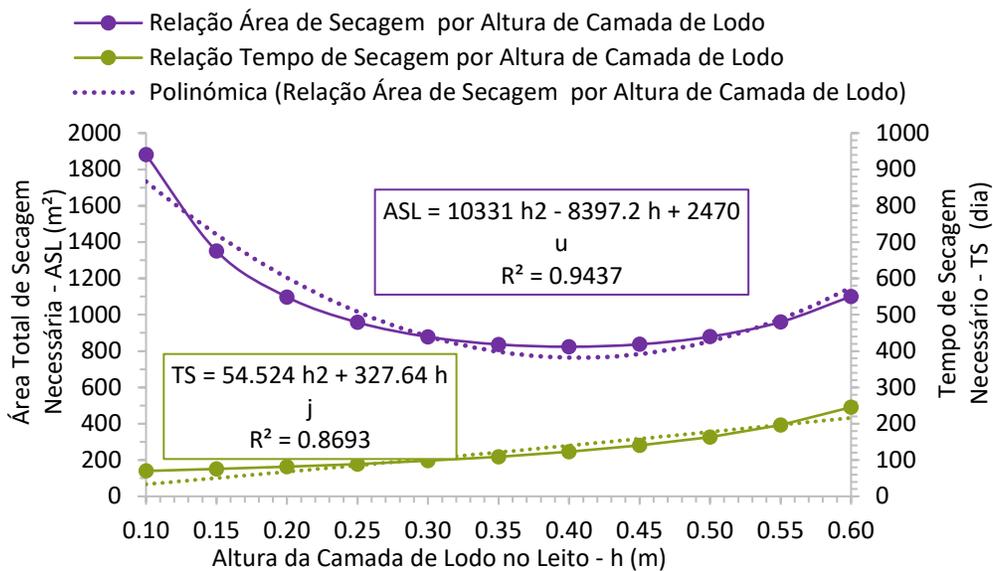
Já a disposição em espessas camadas de lodo nos leitos, pode tratar uma grande quantidade de lodo, necessitando de pouca área para efetuar a secagem natural, o que em primeira análise também é positivo do ponto de vista técnico. Entretanto, a disposição nesta condição tente a requerer longos períodos de secagem, aumentando também os custos com construção da estufa (como o lodo precisa permanecer mais tempo dentro da estufa, é necessário mais espaço para acomodar mais lodo, uma vez que, o lodo continua sendo gerado no processo de produção de água potável), aquisição de área pela estação e aumento da mão de obra operacional.

Assim, para determinar a altura de camada de lodo a ser disposta na estufa, que necessitará da menor área de secagem para “secar” o lodo gerado pela estação, foi utilizado a metodologia proposta por Frata (2019). A qual parte da obtenção da curva e equação descritiva, conforme Figura 6, do comportamento da taxa de secagem à medida que se altera a altura da camada de lodo; conseguida alimentando em uma planilha do software Excel, as taxas de secagem referente a 15, 30 e 60 cm de altura de camada de lodo, determinadas anteriormente conforme Tabela 2.



**Figura 6.** Equação e Curva representativa da Taxa de Secagem (%ST/dia) em função da Altura de Camada de Lodo disposta a secagem natural em estufa piloto.

De posse da equação conseguida pela Figura 6 e dos resultados obtidos pelas Equações 1 e 2, conforme Tabelas 4 e 5, foi gerado o gráfico apresentado segundo Figura 7.



**Figura 7.** Variação da área total de secagem necessária da estufa pelo tempo necessário de secagem em função da altura da camada de lodo disposta no leito da estufa piloto em estudo.

**Tabela 4.** Resultados obtidos no experimento, relativos à tempos de secagem em função da altura de camada de lodo disposta a secagem,

ALTURA DA CAMADA DE LODO (cm)	TEMPO DE SECAGEM (dia)
10	70
15	76
20	82
25	89
30	98
35	109
40	123
45	140
50	164
55	197
60	246

**Tabela 5.** Resultados obtidos no experimento, relativos à área de secagem necessária em função da altura de camada de lodo disposta a secagem.

ALTURA DA CAMADA DE LODO (cm)	ÁREA DE SECAGEM (m <sup>2</sup> )
10	1,880.78
15	1,350.45
20	1,097.38
25	957.85
30	878.19
35	836.55
40	823.70
45	837.07
50	879.33
55	959.90
60	1,100.97

Com base na curva apresentada pelo gráfico da Figura 7, é possível observar que na medida que se dispõe lodo em “finas” camadas é preciso de uma área de secagem elevada, apesar de, necessitar de um tempo de secagem menor para atingir 90% de Sólidos Totais – ST, quando comparado aos tempos necessários para disposição em alturas de camadas de lodo mais elevadas. Contudo, foi possível verificar que, na medida que se aumenta a altura na camada de lodo, a área necessária diminui, o que era esperado, pois com alturas maiores é possível dispor maior quantidade de lodo nos leitos, entretanto o tempo de secagem aumenta.

Esse comportamento decrescente na área de secagem, a medida que se aumenta a altura da camada de lodo, é constatado até um certo ponto na curva (ponto de inflexão), o que também era esperado, pois com alturas maiores há uma necessidade de manter o lodo em processo de secagem natural por mais tempo, devido a diminuição na taxa de secagem e, desta forma, o aumento da altura da camada de lodo, ao invés de provocar uma diminuição na área total de secagem necessária, passa a provocar uma necessidade maior de área.

Portanto, verifica-se que, conforme Figura 7 que a altura de camada ideal, ou seja, aquela que demanda a menor área necessária para realizar a secagem do lodo nas condições estudadas, foi a de 40 cm. Desta forma, para a estufa piloto em estudo, ao se dispor lodo desaguado com uma concentração de Sólidos Totais – ST de 20% em uma altura de camada igual a 40 cm, a Figura 7 ou Tabela 4 informa um tempo necessário e aproximado de 123 dias de secagem natural. Já a área total necessária para realizar a secagem do lodo por este período e nestas condições, até uma concentração de Sólidos Totais – ST de 90%, é conforme Figura 7 ou Tabela 5 de aproximadamente 824 m<sup>2</sup>.

Comparando os resultados obtidos com aqueles adquiridos por Frata (2019), foi possível verificar que o fechamento das laterais não contribuiu de forma significativa na eficiência de secagem. Uma vez que, para uma altura de camada igual a 40 cm, no estudo de Frata (2019), foi necessário uma área total de secagem de 750 m<sup>2</sup> levando para atingir os 90% de Sólidos Totais – ST no lodo, um tempo de secagem necessário de 111 dias. Já no presente estudo, conforme descrito anteriormente, foi necessário uma área de 824 m<sup>2</sup> e um tempo de secagem aproximado de 123 dias.

Cabe ressaltar que, a altura de camada de lodo ideal, que demandará a menor área necessária para realizar a secagem do lodo produzido diariamente pela estação, obtida por Frata (2019), foi de 35 cm, levando 97 dias para “secar” o lodo até 90% de ST no lodo e utilizando uma área de secagem de 743 m<sup>3</sup>. Para esta mesma condição, o presente estudo, apontou a necessidade de se manter o lodo por mais 12 dias e dispor de 836.55 m<sup>2</sup>; constatando novamente uma queda de eficiência na secagem pelo fechamento das laterais.

### Conclusões

Os valores médios de Temperatura média e Umidade média do ar externo a estufa, determinados foram respectivamente 27.23°C e 67.39%, tais valores são similares aos determinados em outros experimentos realizados anteriormente na mesma ETA de estudo, o que era esperado, pois se trata do mesmo local de experimentação. Além disso, as medições realizadas são referentes ao ar externo a estufa e, deste modo, não sofrem influência das características construtivas dela. Comparando os valores de Temperatura média e Umidade

média do ar interno a estufa, ou seja, 29.54°C e 63.99% com os valores médios do ar externo respectivamente 27.23°C e 67.39%, foi possível verificar que o ar dentro da estufa permaneceu em média, com maiores valores de temperatura e menores valores de umidade, o que é apropriado, uma vez que, o equilíbrio da pressão de vapor entre a água presente no lodo e a água presente no ar interno se torna mais distante, quando comparado com o equilíbrio da pressão de vapor entre a água presente no lodo e a água presente no ar externo.

A concentração de Sólidos Totais - ST alcançada no experimento, para os 76 dias de secagem natural em estufa, foi de 87.20%, 74.40% e 50.30% respectivamente para as camadas de 15 cm, 30 cm e 60 cm. Portanto, o melhor resultado foi para camada de 15 cm, pois nesta, obteve-se uma maior concentração de ST e um valor maior no parâmetro taxa de secagem, ou seja, nesta altura houve maior velocidade de secagem e um menor tempo gasto para secar o lodo. Ainda, para a referida altura, o tempo de secagem considerado adequado foi de aproximados 40 dias, este que, é um período relativamente curto para a tecnologia de secagem natural.

Entretanto, a altura da camada de lodo que representou a menor área necessária para secagem, foi a de 40 cm, embora os experimentos mostraram que a camada de 15 cm apresentava melhores taxas de secagem, ao se utilizar esta altura de camada, requer maiores áreas de secagem bem como maiores estruturas de estufas. Assim, a altura que representou o melhor custo-benefício a de 40 cm.

Foi possível verificar que, o fechamento das laterais não contribuiu na eficiência de secagem do sistema, como era esperado, tornando-o menos eficiente, quando comparado com a estufa de laterais abertas. Pois, foi necessário uma área total de secagem maior e um tempo de secagem também superior para atingir uma mesma concentração de ST no lodo. Caso houvesse instalado na estufa piloto um sistema mecânico de recirculação do ar interno com o ar externo, é provável que se verificaria uma eficiência maior do que a obtida no presente estudo.

Comparando os resultados determinados com outros estudos de secagem em estufa, como aqueles citados neste trabalho, o estudo possibilitou constatar significativas conclusões. A primeira foi averiguar nos ensaios que a secagem realizada com a cobertura, proporcionou o efeito estufa em um volume controlado e permitiu uma temperatura interna superior a exterior, assim como constado nos estudos disponíveis na literatura. Do mesmo modo, verificou-se também, que a velocidade de secagem do lodo diminui rapidamente no início da secagem e que, após passado um período de tempo a umidade reduz cada vez mais lentamente. Fatos de considerável importância para estudos que envolvam a secagem de lodos.

## Referências

- AGÊNCIA SENADO, Senado notícias (2020) *Tasso recomenda aprovação do marco do saneamento básico como veio da Câmara*. Da redação, 2020. Acesso em 02 de novembro de 2020, disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/06/19/tasso-recomenda-aprovacao-do-marco-do-saneamento-basico-como-veio-da-camara>
- Ameri, B.; Hanini, S.; Benhamou A.; Chibane, D. (2018) Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. The Official Journal of the International Solar Energy Society. *Energia Solar*, **159**, 722-732.
- Bennamoun, L.; Arlabosse, P.; Léonad, A. (2013) Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **28**. 29-43.
- Collard, M., Teychené, B., Lemée, L. (2017) Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes: Solar, Thermal and reed beds e Impact on organic matter characteristics. *Journal of Environmental Management*, **203**, 760-767.
- Di Bernardo, L., Dantas, A., Voltan, P., E., N. (2012) *Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água*. São Carlos: editora LDiBe LTDA. 540 p.
- Frata, G., A., (2019) *Desenvolvimento de Metodologia para Dimensionamento de Estufa de Secagem Natural para Lodo de Estações de Tratamento de Água*. Tese de Doutorado apresentada ao Centro de Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP.
- FUNASA, Fundação Nacional de Saúde (2017) *Programas Institucionais/Engenharia de Saúde Pública: Saneamento para Promoção da Saúde*. Brasília: Funasa, 2017. Acesso em 09 de dezembro de 2020, disponível em: <http://www.funasa.gov.br/saneamento-para-promocao-da-saude>
- Kurt, M., Aksoy, A., Sanin, F. D. (2015) Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements. *Water Research*, **82**(2015), 47-45.
- Mathioudakis, V., L., Kapagiannidis, A., G., Athanasoulia, E., Diamantis, V., I, Melidis, P., Aivasidis, A. (2009) *Externded Dewatering of Sewage Sludge in Solar Drying Plant*. Desalination 248. p.733-739.
- PCJ, Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (2011) *Bacias PCJ deverão gerar quase 3 mil toneladas por dia de lodos de ETA e ETe em 2020*. Portal de Notícias, 2011. Acesso em 29 de novembro de 2020, disponível em: <https://agua.org.br/noticias/bacias-pcj-deverao-gerar-quase-3-mil-toneladas-por-dia-de-lodos-de-eta-e-ete-em-2020/>
- PCJ, Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (2018) *Primeira Revisão das Bacias PCJ*. Piracicaba: Consórcio Profill-Rhama, 2018. Acesso em 03 de dezembro de 2020, disponível em: [https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=846:primeira-revisao-pb-relatorios-finais&catid=122&Itemid=345](https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=846:primeira-revisao-pb-relatorios-finais&catid=122&Itemid=345)
- PROSAB, Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (1999) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 240 pp.
- Salihoglu, N. K., Pinarli, V., Salihoglu, G. (2007) Solar drying in sludge management in Turkey. *The Journal of Renewable Energy*, **32**, 1661-1675.
- Shao, L., Wang, T., Zhao, L., Wang, G.; LÜ, F., He, P. (2015) The Effect of Adding Straw on Natural Solar Sludge Drying. *Drying technology*, 12 March 2015, **33**(4), 414-419.
- SIMA, Secretaria Infraestrutura e Meio Ambiente (2020) *Plano Estadual de Recursos Hídricos 2020-2023*. Acesso em 03 de dezembro de 2020, disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/perh20202023>
- Wang, P., Mohammed, D., Zhou, P., Lou, Z., Qian, P., Zhou, Q. (2019) Roof solar drying processes for sewage sludge within sandwich-like chamber bed. *Renewable Energy*, **136**, 1071-1081.