

VARIANTES DO

MEIO AMBIENTE:

Atuação, interdisciplinaridade e Sustentabilidade

ROGER GOULART MELLO
PATRÍCIA GONÇALVES DE FREITAS
ORGANIZADORES



2021

CAPÍTULO 3

LEITOS DE SECAGEM NA DESIDRATAÇÃO DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO-MODELAGEM MATEMÁTICA

Arthur Aparecido Janoni Lima, Mestre em Tecnologia Ambiental, IPB e Engenheiro Ambiental

Joseane Débora Peruço Theodoro, Doutora em Engenharia Química, UEM e Professora Universitária, UTFPR

Ramiro José Espinheira Martins, Doutor em Engenharia Química, FEUP e Professor Universitário, IPB

RESUMO

Nas últimas décadas, é notória a crescente preocupação relativa à coleta e tratamento de águas residuais domésticas. Agravado pelo fato de que cada vez mais a população tem vindo a crescer, o impacto ambiental causado pelo lançamento desse tipo de efluente, sem o devido tratamento, nos corpos hídricos, é realmente significativo. O tratamento de esgoto sanitário gera subprodutos, designados lodos de esgoto. Estes, também devem receber tratamento adequado, passando por processos que satisfaçam as condições mínimas exigidas à disposição final pretendida. O processo de tratamento do lodo engloba três objetivos principais: Estabilização da matéria orgânica, redução da carga patogênica e redução de volume. A desidratação, representa uma etapa essencial no processo de tratamento de lodos, já que se traduz em diminuição de volume, promovendo uma maior facilidade de manejo e menores custos de transporte, bem como uma redução dos custos de disposição final em aterro sanitário. Alguns métodos existentes para a desidratação de lodo são rápidos e eficientes (métodos mecânicos), entretanto requerem um elevado consumo energético, tornando o processo oneroso. Como alternativa, para países em desenvolvimento e com clima quente, onde o quesito financeiro é determinante, os leitos de secagem (método natural), que funcionam com fenômenos naturais para a evaporação e drenagem da água, surgem como uma alternativa eficiente, atendendo à simplicidade de construção e de operação e ao reduzido investimento inicial. O objetivo principal do trabalho foi a formulação de um modelo matemático que descreva a desidratação de lodos de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), em função das condições climáticas. O trabalho experimental foi realizado em dois ciclos, com períodos de 30 dias cada. O primeiro ciclo decorreu durante a estação quente e seca e o outro no período frio e de chuva. Foram construídos 4 leitos de secagem, os quais possuíam características diferentes, na espessura da camada de lodo ou na forma em que eram operados. Portanto, 4 modelagens foram criadas, para satisfazer cada configuração de leito. Os resultados dos modelos foram satisfatórios e uma significativa redução de volume foi obtida; para o período quente e seco, o leito T1 – 1 (20 cm de lodo e com revolvimento) registou melhores resultados, partindo de um teor de sólidos de 4,68% e chegando a valores próximos a 70%; relativamente ao período frio e de chuva, os resultados entre todos os leitos foram semelhantes, independente da configuração ou operação de cada um.

PALAVRAS-CHAVE: Modelação Matemática; Saneamento; Leitos de Secagem; Desidratação de Lodo; Lodo de Esgoto.



INTRODUÇÃO

Tratar o efluente, antes do lançamento, é crucial para o equilíbrio ambiental. Diversas conferências, ligadas ao tema, vem sendo realizadas nas últimas décadas (ONU, 2017), evidenciando um problema relacionado ao assunto e a necessidade do debate e pesquisa. O tratamento de efluentes gera um subproduto chamado lodo (ou Lama). Mesmo possuindo 95% de água, os lodos são considerados resíduos sólidos (Sperling e Franci, 2001). E, são formados pelas partículas sólidas separadas da fração líquida no processo.

O tratamento de lodos engloba três objetivos principais, são eles: A estabilização da matéria orgânica, redução da carga bacteriológica e redução do volume. A desidratação dos lodos gerados é imprescindível para uma gestão mais eficiente, já que a redução de volume gera uma maior facilidade de manejo e menores custos com transporte, bem como para disposição em aterro sanitário.

São várias as técnicas utilizadas para a desidratação de lodos. Algumas implicam o consumo de energia elétrica, tornando o processo dispendioso, além da complexidade de instalação e operação, entretanto são mais rápidas e compactas. Outros métodos, como os Leitos de Secagem - LS, utilizam de fenômenos naturais para a evaporação e lixiviação da água incorporada. As diferentes técnicas são escolhidas de acordo com o volume de lama a se tratar, espaço e tempo disponível para o processo.

Os leitos de secagem são isentos de gastos energéticos e possuem instalação e operação simples, a necessitar apenas de tempo e espaço superiores aos métodos energéticos (Sperling, 2007). Basicamente, os leitos de secagem expõem a lama ao ambiente sob leitos drenantes, que utilizam materiais simples, como britas e areia. Os leitos drenantes podem ser configurados de diferentes maneiras, variando a composição de suas camadas em: Materiais; espessuras; ou a ordem de sobreposição.

Os leitos de secagem se apresentam viáveis para regiões com clima quente e que tenham baixo índice pluviométrico, já que utiliza de fenômenos naturais para a desidratação das lamas. Vários países, ou regiões em desenvolvimento, apresentam tais características climáticas, isso contribui para o aumento do saneamento básico nessas áreas, já que o fator econômico é prioritário.

Muitos autores obtiveram valores significativos nos estudos realizados, no que respeita à redução do volume de lodo: 59%, Coimbra e Achon, 2016; 65%, Achon, Coimbra e Kellner, 2019.



Como a escolha de leitos de secagem, como método de tratamento de lodos de uma estação de tratamento de efluentes, leva em consideração o volume de lama gerado, o espaço disponível e os padrões meteorológicos da região, é de extrema importância a existência de modelos matemáticos que relacionem esses dados. Assim, permitindo avaliar a viabilidade técnica do processo para cada situação. Neste estudo pretendeu-se desenvolver um modelo matemático que descrevesse, de modo aproximado a realidade, a desidratação de lodos provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto - ETE em leitos de secagem, relacionando dados meteorológicos no balanço de massa de água.

REFERENCIAL TEÓRICO

O tratamento de esgoto gera subprodutos, um deles é o lodo. Existem diferentes tipos de lodo. Nos tratamentos que desfrutam de decantadores primários, são gerados os lodos primários. Em seguida, no tratamento biológico, a biomassa que digeriu os nutrientes do efluente, morrem e geram o lodo secundário, ou lodo biológico. O lodo primário e o secundário podem ser tratados juntamente e, quando misturados, são chamados de lodo misto. Por fim, quando existente, o tratamento terciário gera o chamado lodo terciário. Esses lodos, mesmo que 95% de sua composição seja água, são retiradas do processo para que o efluente final tenha concentrações pequenas de sólidos em suspensão (Sperling e Franci, 2001).

Os lodos provenientes de esgoto urbano são chamados de lodos de depuração, assim como os lodos de fossas sépticas e dos tratamentos de águas residuais de atividades agropecuárias (Portugal, 2019). A percentagem de sólidos nestas águas é de apenas 0,1% (Sperling, 2007) e cerca de 60 a 80% destes sólidos são orgânicos, representados pela fração volátil (Metcalf and Eddy, 1995).

Quanto melhor um efluente é tratado mais lodo é gerado, pois as impurezas da água são basicamente materiais sólidos. Portanto, a baixa concentração desses materiais na água eleva seu grau de pureza.

O lodo, antes de ser disposto, deve passar pelo adequado tratamento, pois cada utilização final requer um nível específico de tratamento (Sperling e Franci, 2001).

O seu gerenciamento possui seis etapas, que são combinadas conforme a necessidade do nível de tratamento. As lamas provenientes de lagoas de estabilização, reatores anaeróbicos e lamas ativadas com aeração prolongada, por exemplo, já saem estabilizadas, necessitando apenas eliminar umidade para a disposição e, higienização caso seu destino não seja aterros sanitários ou incineração.



A desidratação das lamas tem como objetivo diminuir a umidade e, conseqüentemente, o volume das mesmas. Segundo Metcalf & Eddy (1995), a utilização do processo visa:

- Diminuição de custos com transporte, visto a diminuição de volume;
- Facilidade de manuseio;
- Aumento do poder calorífico, facilitando a incineração (Menor umidade);
- Diminuição de odores;
- Diminuição de lixiviado em aterros sanitários.

De acordo com Reali (1999), o estado físico da água presente nas lamas influencia o processo de desidratação. O grau de dificuldade de retirada de água do lodo  : Como a mais fácil, a água livre; a água intersticial, ou capilar, em segundo; água vicinal em terceiro; e por último, o estado físico onde se encontra a maior dificuldade, a chamada água de hidrata o. A  gua livre não está associada com as partículas sólidas, por isso a maior facilidade de retirada do lodo; a água capilar está ligada mecanicamente, presa aos interstícios dos flocos; já a água vicinal,   constituída por múltiplas camadas de H₂O ligadas as partículas sólidas, por meio de pontes de hidrog nio; e, por último, a água de hidrata o que também está ligada quimicamente, no interior das partículas sólidas.

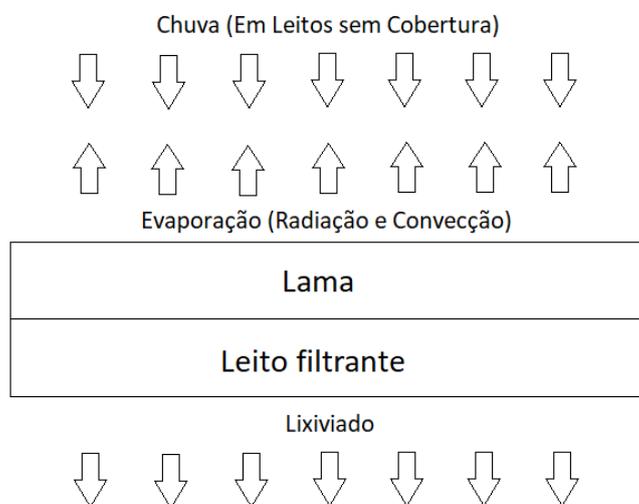
Os processos de desidrata o podem ser feitos através de métodos naturais ou de métodos mecânicos. Os processos naturais são mais simples e baratos, porém utilizam grande espaço físico e elevado tempo para a desidrata o. Em controversa, os processos mecânicos são mais caros, e alguns necessitam de um bom condicionamento da lama afluyente, porém são rápidos e compactos (Sperling, 2007).

Se tratando de métodos naturais para a desidrata o de lodo, os leitos de secagem são sistemas simples. Normalmente são tanques retangulares de pouca profundidade, com uma leve inclina o de fundo, de forma a conduzir lixiviados para um local de escape. No interior dos tanques   construído um meio de enchimento poroso, constituído de diferentes granulometrias de areia e brita, que serve de suporte para a lama e também como um filtro para a água presente no sistema.

A desidrata o em LS ocorre em batelada, a incidência de radia o solar reduz, significativamente, a concentra o de microrganismos patog nicos nos lodos, bem como a diminui o da disponibilidade de água ao decorrer do processo, visto que alguns microrganismos necessitam de água para locomo o e reprodu o (Lampreia, 2017).

Figura 1 mostra a interação dos fenômenos naturais nos leitos de secagem.

Figura 1: Interação dos leitos de secagem com o ambiente



Fonte: Cordeiro (1999).

A construção dos LS pode ser dividida em três partes: Tanques, sistema de drenagem e meio drenante.

Os tanques são, normalmente, retangulares ou quadrados, rasos e impermeáveis. Segundo as recomendações de Metcalf & Eddy (1995), os tanques devem possuir largura de aproximadamente 6 metros e comprimento de 6 a 30. Esses valores podem variar dependendo do método de remoção das lamas desidratadas, se a retirada desse material for feita mecanicamente as dimensões adotadas devem assegurar a movimentação dos equipamentos no interior dos leitos.

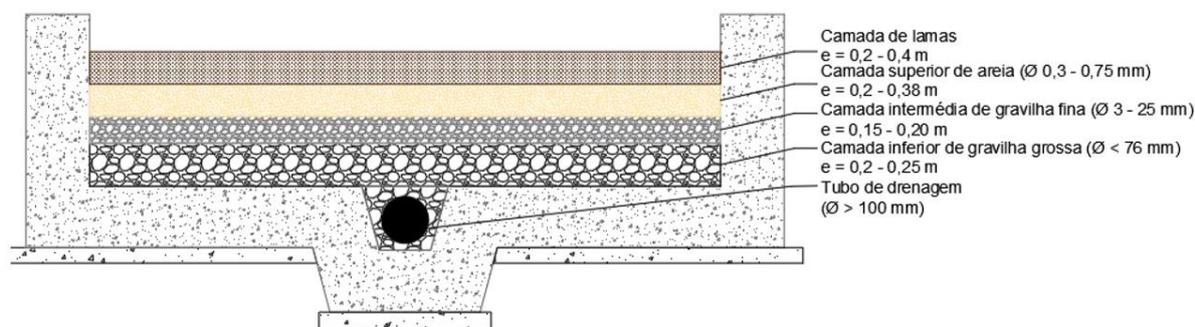
O sistema de drenagem serve para retirada do efluente que percola através do meio drenante. Este sistema deve captar o lixiviado igualmente. Para isto, se utiliza tubos em sentido transversal, com pequenos furos, que se conectam a um tubo principal. Os tubos devem ser cobertos por brita e ter declive mínimo de 1%, para escoamento do líquido. Os diâmetros não devem ser menores do que 100 mm e os tubos não devem ficar a uma distância maior que 6 m entre eles (Metcalf & Eddy, 1995).

O meio drenante, ou meio de enchimento, serve de suporte para a camada de lama e também é responsável pela percolação da água existente no lodo. Para um sistema efetivo de drenagem, deve-se utilizar materiais e granulometria adequadas nas diferentes camadas, isso evita colmatação e conseqüentemente um mau funcionamento do sistema (Lampreia, 2017).

O perfil do meio drenante de um LS, segundo Matcalf & Eddy (1995), deve conter uma camada de 75 a 150 mm de brita grossa, na base, seguida de: 75 mm de brita média; 75 mm de

brita fina; e 200 a 300 mm de areia, com granulometria entre 0,3 e 0,75 mm. Outros autores apresentam granulometrias diferentes, um exemplo é mostrado na Figura 2.

Figura 2: Meio drenante de um LS



Fonte: Turovskiy and Mathai (2006).

Embora os leitos de secagem possuam uma operação simples, alguns cuidados devem ser tomados. A não ser que seja a primeira utilização dos leitos de secagem, os mesmos exigem uma preparação ao início de um novo ciclo, essa preparação consiste em retirar materiais remanescentes dos ciclos passados, adição de areia, para completar a camada superficial, caso tenha tido perdas da mesma, e também seu nivelamento. É recomendado substituir regularmente a camada de areia para minimizar o processo de colmatação.

O lodo pode receber revolvimento, esse processo pode ser feito manualmente ou com auxílio de máquinas. Este, busca, segundo Metcalf & Eddy (1995), uma melhor evaporação, já que uma crosta superior é formada, dificultando a interação da umidade do interior da camada de lama com o ambiente.

O número de LS é definido de acordo com as quantidades de lodo a se desidratar e da espessura da camada a se utilizar. Geralmente é construído um leito a mais para situações de imprevistos. Essa estimativa pode ser feita através de uma modelagem matemática, que relaciona o volume de lodo gerado, área disponível e previsões meteorológicas

A modelagem matemática para desidratação de lodos em LS ainda é um assunto novo na literatura, possuindo poucos estudos a cerca da temática.

Como o processo de desidratação de lamas em LS envolve fenômenos de transferência de calor e massa e em virtude da complexidade da interação desses fenômenos, faz-se necessário a adoção de algumas considerações genéricas, como por exemplo: Não considerar as trocas térmicas entre o lodo e as paredes laterais dos tanques; considerar que as lamas irão conter as mesmas características ao longo da superfície; e que no processo de evaporação a água seja tratada, ao todo, como água livre. Não considerando as forças de capilaridade que as



moléculas sofrem; relativo aos sólidos, não se considera a perda de partículas ao decorrer do processo.

A transferência de calor, segundo Incropera et al. (2007), “é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”. Sempre que existir diferença de temperatura entre as extremidades de um mesmo objeto, ou entre objetos separados, haverá transferência de calor.

Existem três tipos de transferência de calor, a condução, a convecção e a radiação. A condução acontece quando há um gradiente de temperatura em um sólido ou em um líquido. Este meio tende a ficar por completo em uma única temperatura. A convecção ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, onde necessariamente deve existir uma diferença de temperatura. Por último, a troca de calor por radiação não necessita de um meio material para se propagar. Todas as superfícies sólidas, líquidas e os gases, emitem e absorvem radiação térmica (Incropera et al., 2007).

Portanto, para a determinação da água que evapora de um corpo, utiliza-se as equações de transferência de calor e massa, relativas as características dos LS (Lima, 2020, p. 50). Para a formulação da modelagem, deve-se considerar os LS como sistemas fechados, denominados volumes de controle. A inserção de energia térmica no sistema faz com que a água mude do estado líquido para o gasoso, no qual tende a atravessar as fronteiras do sistema e deixa-lo. Para a determinação do volume de água que sai do sistema, deve-se contabilizar a saída da água drenada, somada a água evaporada e diminuída a precipitação que adentra ao leito, esse cálculo é denominado balanço hídrico.

METODOLOGIA

O estudo experimental consistiu no projeto, construção e aplicação de leitos de secagem para a desidratação de lodos mistos (decantador primário e secundário) da ETE de Bragança, Portugal, a qual utiliza lodos ativados convencionais como tratamento biológico. O experimento foi realizado em dois períodos de 30 dias cada, um em período seco e quente (27/05/2019 a 26/06/2019) e outro em período chuvoso e frio (16/10/2019 a 15/11/2019).

A Estação de Tratamento de Lodos por Leitos de Secagem - ETLs foi construída especialmente para este trabalho. Instalada no interior do Campus de Santa Apolónia, Instituto Politécnico de Bragança – IPB, foi composta por 6 leitos de secagem, todos expostos ao ambiente sem qualquer edificação próxima, a fim de garantir que os fenômenos meteorológicos não sofressem interferências.



Para a construção dos LS foram utilizados tanques, de seção quadrada (1m x 1m) e volume útil de 1000L. Tanques perfeitamente impermeáveis, sem tampa, com uma torneira na base para recolha do líquido drenado. Todos os tanques possuíam uma haste graduada em seu interior, para a medição da espessura da camada de lodo.

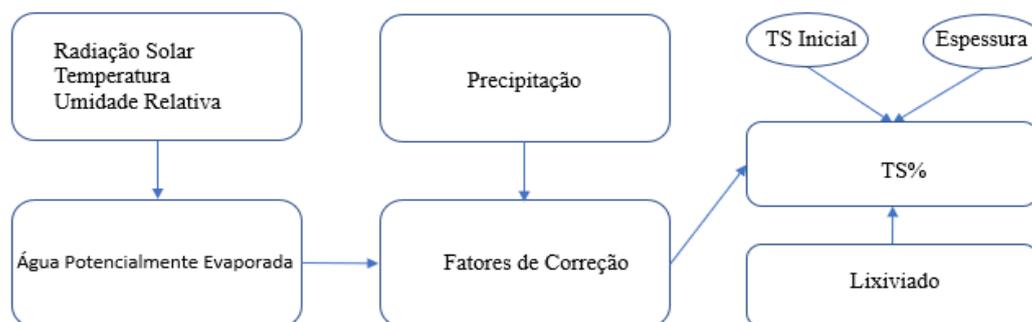
O meio drenante dos LS foram formados por 3 camadas de material, sobrepostas. Nos tanques 1 a 4 foram utilizados: na base, uma camada de 30 cm de altura de brita grossa (20-32 mm), seguida de 10 cm de brita fina (8-12 mm), e por último, 10 cm de areia (granulometria até 0,6 mm). Já nos tanques 5 e 6 a camada de areia foi substituída por uma camada de 10 cm de cortiça moída, resíduo muito comum em Portugal, a fim de verificar a influência do material na qualidade do lixiviado. Depois dos leitos drenantes pronto, os tanques receberam um determinado volume de lodo: de 20 cm de altura nos tanques 1, 2, 5 e 6 e 30 cm para os tanques 3 e 4.

Os parâmetros analisados durante o monitoramento dos ensaios foram: Teor de Sólidos do lodo (TS); volume de água drenada (diariamente); espessura da camada de lodo (diária); e DQO do lixiviado (3x por semana). A espessura da camada de lodo foi medida a partir das hastes graduadas. Já as análises de TS, em duplicata, e de DQO, em triplicata, foram realizadas de acordo com o Standard Methods (APHA, 1998). E, o volume de água drenada foi medido a partir de galões que captavam o lixiviado na torneira de saída dos LS.

Para os tanques 1, 3 e 5, o lodo foi revolvido e homogeneizado diariamente, com uma pá metálica, com a finalidade de avaliar a influência no processo de desidratação. Todos os procedimentos e análises foram realizados da mesma forma e os mesmos tanques foram utilizados. Contudo, no intervalo entre os períodos, a camada superior de areia foi trocada e as britas foram lavadas, para garantir as mesmas condições experimentais entre os ciclos.

A modelação foi feita a partir da estimativa do balanço de massa de água em cada tanque, considerando as seguintes entrada e saídas do sistema: água evaporada diariamente, estimada com as devidas equações de conversão de energia (Lima, 2020, p. 50), utilizando dados de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar (dados da estação meteorológica do IPB); volume de água drenado diariamente, relativo à água inicial contida nos lodos; e o volume de água precipitada sobre os leitos. A Figura 3 mostra o fluxograma para a elaboração dos modelos, onde Fatores de Correção - FC foram atribuídos para corrigir a evaporação e drenagem (Lima, 2020, p. 46-55).

Figura 3: Fluxograma da modelação matemática para desidratação de lamas em leitos de secagem



Fonte: Autoria própria

Para a elaboração do balanço de massa, inicialmente, foi encontrada a água potencialmente evaporada, para cada dia do ensaio experimental, e em seguida determinado o volume de água precipitado. Por último, estimou-se a água drenada dos leitos. Como no primeiro ciclo o volume de chuvas foi pequeno, principalmente nos primeiros dias, onde um maior volume de água foi drenado, adotou-se que a porcentagem do volume de água que drenou dos leitos a cada dia, relativo à água inicial dos lodos, seria um padrão.

Pelo método de tentativa e erro, observando a aproximação da curva teórica com a curva experimental de TS, alguns fatores de correção foram atribuídos, para a correção da evaporação e da drenagem, visto que esses fatores são influenciados pelo valor de TS instantâneo do lodo.

Além de modelar o TS pelo balanço de massa do sistema, também se pode estimar a espessura da camada de lodo. Para a modelagem dessa espessura, 1 cm foi adicionado aos valores, para compensar uma quantidade de espaços vazios (ar) que fica contido no sistema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização de cortiça não ajudou na diminuição das concentrações de DQO. Como se pode ver, no Quadro 1, na primeira semana todos os tanques possuíam uma concentrações de DQO, no lixiviado, em torno de 800-830 mg.L⁻¹. Na segunda semana os leitos 5 e 6, os quais continham cortiça, obtiveram significativa redução do parâmetro, porém a seguir os resultados encontrados não torna a cortiça um elemento eficiente no tratamento do lixiviado, já que os valores voltam a subir e não acontece um padrão. Alguns valores aparecem negativos porque o lixiviado apresentava pequena carga orgânica. E, a curva utilizada para determinação das concentrações não era capaz de avaliar concentrações tão pequenas de DQO.

Quadro 1: DQO do ciclo 1

| Tanque 1 | | | Tanque 2 | | | Tanque 3 | | | Tanque 4 | | | Tanque 5 | | | Tanque 6 | | |
|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|
| Data | Dia | CQO (mg/l) |
| 29/05 | 2 | 800,1 | 29/05 | 2 | 800,1 | 29/05 | 2 | 814,4 | 29/05 | 2 | 814,4 | 29/05 | 2 | 829,8 | 29/05 | 2 | 829,8 |
| 04/06 | 8 | 817,2 | 04/06 | 8 | 814,0 | 04/06 | 8 | 819,1 | 04/06 | 8 | 854,8 | 04/06 | 8 | 421,1 | 04/06 | 8 | 580,6 |
| 07/06 | 11 | 759,1 | 07/06 | 11 | 43,1 | 07/06 | 11 | 781,0 | 07/06 | 11 | 3015,6 | 07/06 | 11 | 827,7 | 07/06 | 11 | 1243,1 |
| 11/06 | 15 | 107,6 | 11/06 | 15 | 70,2 | 11/06 | 15 | 795,1 | 11/06 | 15 | 427,7 | 11/06 | 15 | 329,9 | 11/06 | 15 | 593,8 |
| 14/06 | 18 | 80,3 | 14/06 | 18 | -112,6 | 14/06 | 18 | 611,2 | 14/06 | 18 | 129,6 | 14/06 | 18 | 305,4 | 14/06 | 18 | 164,4 |
| 18/06 | 22 | 320,3 | 18/06 | 22 | -80,4 | 18/06 | 22 | 80,7 | 18/06 | 22 | -52,8 | 18/06 | 22 | 64,6 | 18/06 | 22 | 248,8 |
| 21/06 | 25 | -90,1 | 21/06 | 25 | -146,0 | 21/06 | 25 | 125,0 | 21/06 | 25 | 138,8 | 21/06 | 25 | 169,6 | 21/06 | 25 | 211,0 |
| 25/06 | 29 | -99,7 | 25/06 | 29 | 664,3 | 25/06 | 29 | -48,6 | 25/06 | 29 | 45,2 | 25/06 | 29 | 107,2 | 25/06 | 29 | 1628,0 |
| 26/06 | 30 | -5,9 | 26/06 | 30 | 8,9 | 26/06 | 30 | 178,3 | 26/06 | 30 | 310,3 | 26/06 | 30 | 53,0 | 26/06 | 30 | 1487,1 |

Fonte: Autoria própria

Como os valores de DQO do lixiviado se comportaram de maneira muito distinta entre todos os LS e, além da cortiça não apresentar melhoras na qualidade do mesmo, ter dificultado a operação por ter se misturado com o lodo, decidiu-se não a utilizar para o ciclo 2. Eliminando os tanques 5 e 6 do experimento e, também, as análises de DQO.

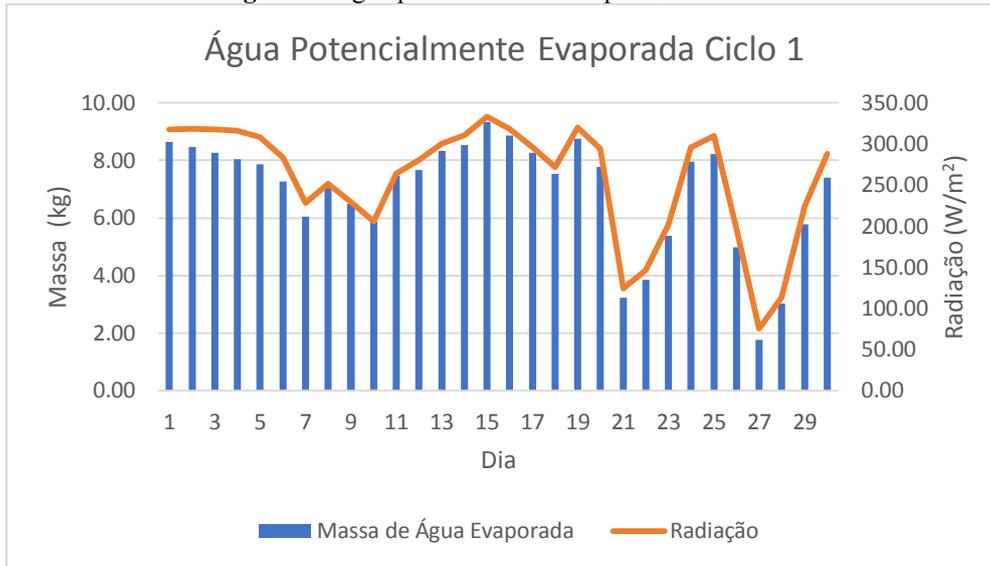
Como os LS foram operados ou receberam um volume de lodo diferente, foram feitos 4 modelos matemáticos, seguindo as especificações de cada um.

A primeira etapa da modelagem matemática foi a estimativa da massa de água evaporada do sistema, que possui influência da umidade relativa do ar e da temperatura, além da radiação solar, que tem efeito predominante sobre o fenômeno. Como já esperado, o ciclo 1 obteve valores maiores de água potencialmente evaporada, já que a radiação média do período é mais do que 4 vezes a do ciclo 2.

Contudo, os cálculos consideram uma situação ideal, como se a camada exposta ao ambiente fosse composta apenas por água.

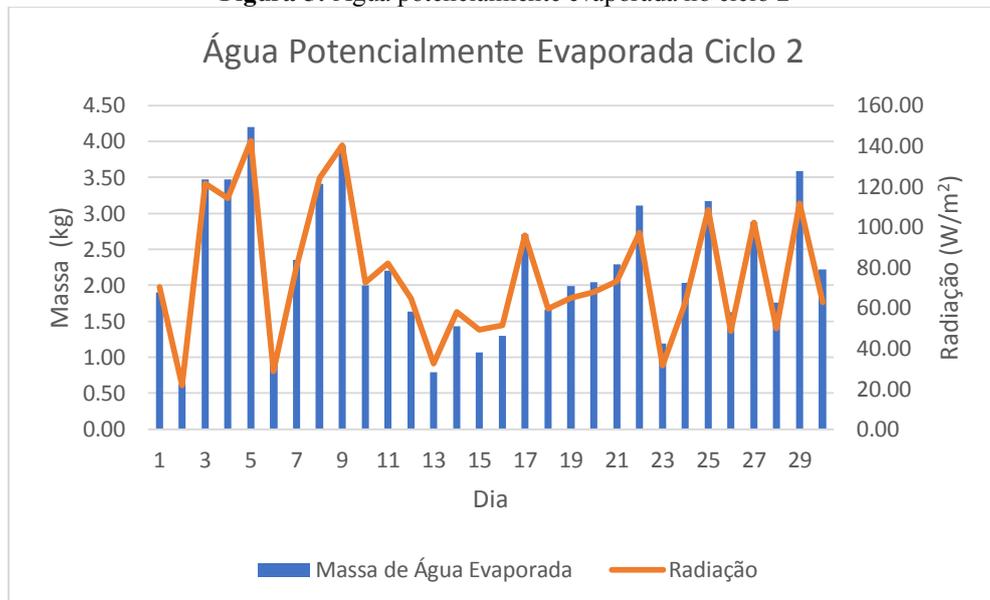
A Figura 4 mostra a massa de água potencialmente evaporada, no ciclo 1, e também a radiação média, diariamente. Da mesma forma, a Figura 5 mostra os valores para o ciclo 2.

Figura 4: Água potencialmente evaporada no ciclo 1



Fonte: Autoria Própria

Figura 5: Água potencialmente evaporada no ciclo 2



Fonte: Autoria própria

Se tratando da drenagem referente à água inicial do sistema, foi calculada com os dados do ciclo 1, pois nesse período ocorreu precipitação em poucos dias, o que possibilitou a determinação do padrão de drenagem nos leitos, referindo-se apenas a água presente inicialmente nos lodos. Não houve diferença significativa no comportamento da drenagem nos LS com mesma espessura de camada de lodo, mesmo um recebendo e o outro não o revolvimento diário. Por essa razão, foram feitas apenas duas estimativas: Para 20 cm de camada de lama e 30 cm, independente da operação.

A Tabela 1 mostra, para os tanques com 20 cm e 30 cm de camada de lodo, as porcentagens estimadas de água drenada, relativa à inicial. Como era sabido o teor de sólidos

inicial do lodo e o volume em cada tanque, facilmente foi encontrada a porcentagem (aproximada) drenada, dia a dia, relativa à água inicial do sistema.

Tabela 1: Água drenada inicial para os LS de 20 e 30 cm

| Dia | Precipitação | Drenado (20 cm) [L] | % da inicial | Drenado (30 cm) [L] | % da inicial |
|-----|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|
| 1 | 0,00 | 26,63 | 25,0 | 21,35 | 20,0 |
| 2 | 0,00 | 17,97 | 20,0 | 17,05 | 15,0 |
| 3 | 0,00 | 10,52 | 10,0 | 13,23 | 13,0 |
| 4 | 0,00 | 4,84 | 5,0 | 9,11 | 9,0 |
| 5 | 0,00 | 3,41 | 3,5 | 4,74 | 5,0 |
| 6 | 0,00 | 1,57 | 1,5 | 2,01 | 2,0 |
| 7 | 0,00 | 1,10 | 1,0 | 1,28 | 1,3 |
| 8 | 0,20 | 0,58 | 0,5 | 0,92 | 0,9 |
| 9 | 0,00 | 0,48 | 0,5 | 0,68 | 0,7 |
| 10 | 15,60 | 3,05 | 0,5 | 0,56 | 0,5 |
| 11 | 0,00 | 0,65 | 0,5 | 0,57 | 0,5 |
| 12 | 0,00 | 0,59 | 0,4 | 0,54 | 0,5 |
| 13 | 0,00 | 0,49 | 0,4 | 0,43 | 0,4 |
| 14 | 0,00 | 0,43 | 0,4 | 0,36 | ,03 |
| 15 | 0,00 | 0,41 | 0,4 | 0,36 | 0,3 |
| 16 | 0,00 | 0,40 | 0,4 | 0,37 | 0,3 |
| 17 | 0,00 | 0,42 | 0,4 | 0,36 | 0,3 |
| 18 | 0,00 | 0,42 | 0,4 | 0,33 | 0,3 |
| 19 | 0,00 | 0,43 | 0,4 | 0,35 | 0,3 |
| 20 | 0,00 | 0,45 | 0,4 | 0,39 | 0,3 |
| 21 | 0,20 | 0,39 | 0,3 | 0,37 | 0,3 |
| 22 | 3,60 | 0,33 | 0,3 | 0,33 | 0,3 |
| 23 | 0,00 | 0,30 | 0,3 | 0,34 | 0,3 |
| 24 | 0,00 | 0,25 | 0,2 | 0,31 | 0,3 |
| 25 | 0,00 | 0,21 | 0,2 | 0,29 | 0,3 |
| 26 | 0,40 | 0,23 | 0,2 | 0,34 | 0,3 |
| 27 | 9,60 | 0,34 | 0,2 | 0,31 | 0,3 |
| 28 | 2,80 | 0,36 | 0,2 | 0,29 | 0,2 |
| 29 | 0,00 | 0,24 | 0,2 | 0,29 | 0,2 |
| 30 | 0,00 | 0,33 | 0,2 | 0,31 | 0,2 |

Fonte: Autoria própria

Para os LS com 20 cm de camada de lodo, observa-se que até o dia 10, onde ocorreu uma precipitação considerável, a porcentagem atribuída era apenas ajustada, para melhor visualização dos dados. Já nos dias onde ocorreu precipitação ou os dias que os sucedem, a drenagem aumentou e uma estimativa, com base no dia anterior, foi feita.

A água precipitada sobre os LS, terceira etapa de análise da modelagem, assim como a água evaporada, se comportava diferente aos diferentes valores de TS em que o lodo se encontrava. Portanto, fatores de correção também foram atribuídos para correção dessa variável do balanço de massa do sistema.

Ao decorrer da modelagem, utilizando o método da tentativa e erro, tentou-se aproximar o máximo possível a curva teórica da curva experimental dos dois ciclos para o mesmo tanque.

Encontrou-se a necessidade da divisão dos LS em categorias, já que as diferenças entre eles refletiam no comportamento da desidratação do lodo. Portanto, os FC são diferentes para os 4 tipos de leitos (20 cm com revolvimento; 20 cm sem revolvimento; 30 cm com revolvimento; e 30 cm sem revolvimento).

A Tabela 2 mostra os FC para os leitos com revolvimento, os mesmos foram atribuídos para faixas de TS em que os lodos se encontravam.

Tabela 2: Fatores de correção de drenagem e de evaporação para os leitos com revolvimento

| Faixa de TS (%) | Drenagem (20 cm) | Evaporação (20 cm) | Drenagem (30 cm) | Evaporação (30 cm) |
|-----------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| <5 | 1,00 | 0,90 | 1,00 | 0,80 |
| 5-10 | 0,70 | 0,40 | 0,60 | 0,40 |
| 10-20 | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 0,35 |
| 20-30 | 0,30 | 0,35 | 0,20 | 0,35 |
| 30-40 | 0,20 | 0,25 | 0,20 | 0,35 |
| 40-50 | 0,10 | 0,25 | 0,20 | 0,30 |
| 50-60 | 0,10 | 0,25 | 0,15 | 0,25 |
| >60 | 0,10 | 0,20 | 0,10 | 0,20 |

Fonte: Autoria própria

Os FC de drenagem, referente à água precipitada sobre o leito, diminuem em função do TS. Tal fato acontece devido a capacidade de absorção do lodo, fazendo com que parte da água fique contida no sistema e evapore posteriormente. Para os FC de evaporação, a tendência é que os valores diminuam conforme o TS aumente, pois o aumento da concentração de sólidos na camada superior de lama dificulta o fenômeno de evaporação da água.

Na Tabela 3 está contido os FC para os leitos sem revolvimento, também atribuídos para faixas de porcentagem de TS. Por não obterem um elevado grau de desidratação, os LS sem revolvimento não possuem faixas de TS superiores a 40%.

Tabela 3: Fatores de correção de drenagem e de evaporação para os leitos sem revolvimento

| Faixa de TS (%) | Drenagem (20 cm) | Evaporação (20 cm) | Drenagem (30 cm) | Evaporação (30 cm) |
|-----------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| <5 | 1,00 | 0,70 | 1,00 | 0,70 |
| 5-10 | 0,80 | 0,30 | 0,80 | 0,30 |
| 10-20 | 0,70 | 0,20 | 0,70 | 0,20 |
| 20-30 | 0,40 | 0,05 | 0,40 | 0,05 |
| 30-40 | 0,30 | 0,05 | 0,30 | 0,05 |

Fonte: Autoria própria

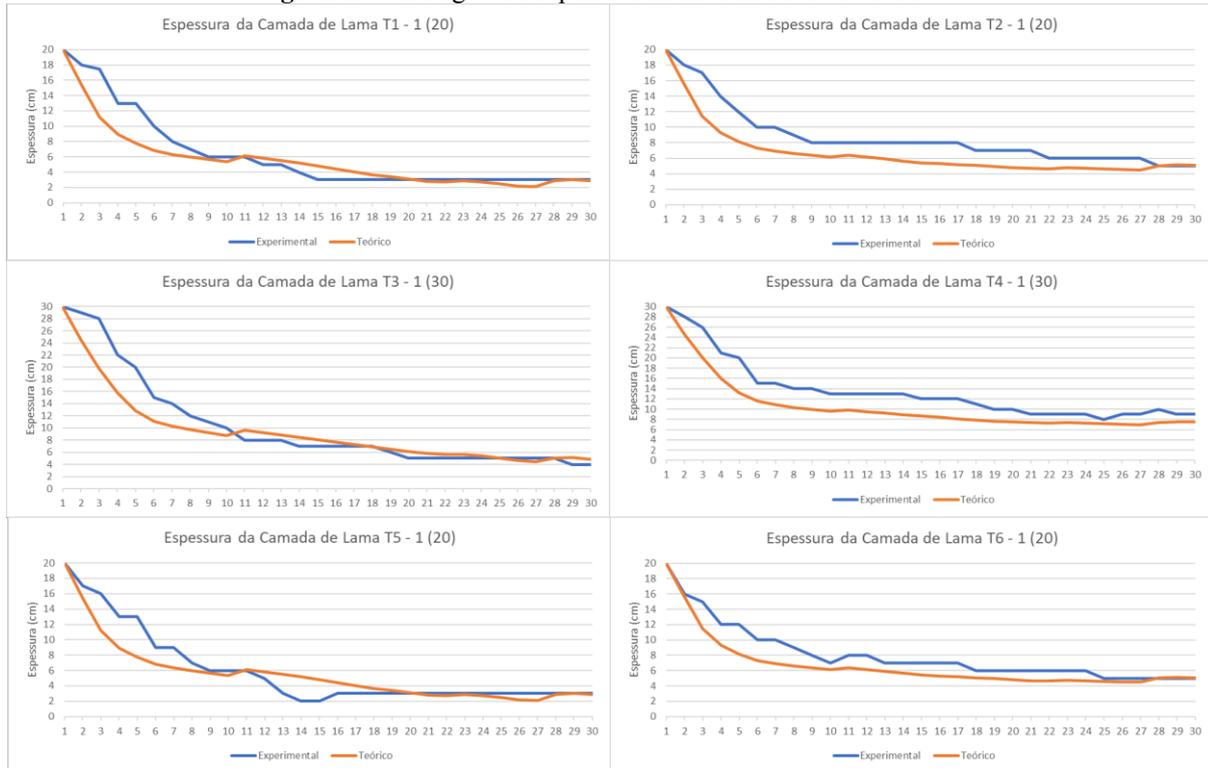
Nota-se que os valores dos FC para os leitos sem revolvimento foram os mesmos, independentemente da espessura da camada de lodo. Possivelmente isso aconteça porque os leitos sem revolvimento tendem a desenvolver um torrão de lodo na camada mais superficial, dificultando a evaporação da água contida em seu interior.

Aplicando: a estimativa de água drenada, relativa à inicial do sistema; as estimativas de água potencialmente evaporada; a precipitação sobre os leitos; e estipulados todos os FC, tem-se o modelo matemático.

A Figura 6 mostra a espessura da camada de lodo experimental (em azul) e a espessura teórica (em laranja), encontrada a partir da modelagem. O T1 – 1 indicado, no primeiro gráfico, se refere ao tanque 1 (LS 1) no ciclo 1 e os demais LS seguem a mesma nomenclatura.

A espessura teórica aproximou-se da experimental, porém existe uma diferença. A curva teórica decresce ligeiramente mais rápido, em relação a curva experimental, porque uma camada de espuma, onde ar está contido no sistema, eleva a espessura do lodo. A curva encontrada, através da modelação, considera nula essa quantidade de ar e, apesar da soma de 1 centímetro para compensação, o valor não é suficiente nos primeiros dias. Contudo, ao fim do ciclo os valores tendem a se igualar na maioria dos leitos.

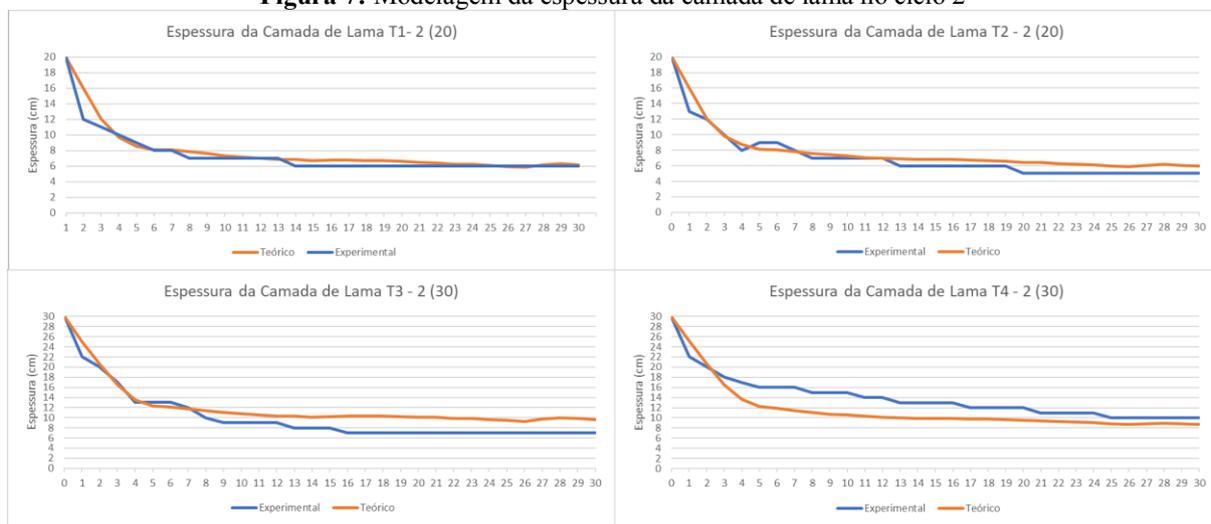
Figura 6: Modelagem da espessura da camada de lama no ciclo 1



Fonte: Autoria própria

A Figura 7 apresenta os resultados para o ciclo 2. Nota-se os valores dos primeiros dias da curva teórica mais próximos à realidade, em relação ao ciclo 1, com exceção do LS 4.

Figura 7: Modelagem da espessura da camada de lama no ciclo 2

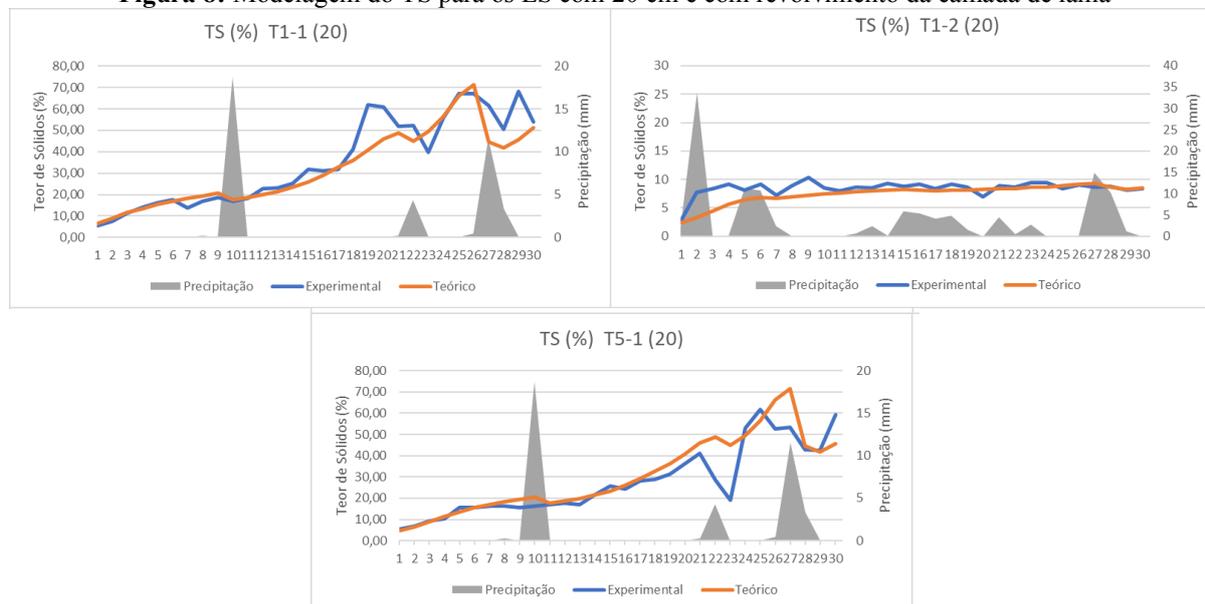


Fonte: Autoria própria

A contribuição da precipitação na compactação das lamelas foi observada. No ciclo 1, a partir do dia 10 (onde ocorreu uma precipitação considerável), a maioria dos leitos obtiveram uma maior aproximação entre as curvas. E, no ciclo 2, onde houveram precipitações espalhadas durante o ciclo, as curvas são mais próximas. Tal fato evidencia essa influência.

Os resultados para o TS, teórico e experimental, estão divididos de acordo com as especificações de cada LS. A Figura 8 relata os resultados para os tanques com 20 cm de camada de lodo e com revolvimento.

Figura 8: Modelagem do TS para os LS com 20 cm e com revolvimento da camada de lama



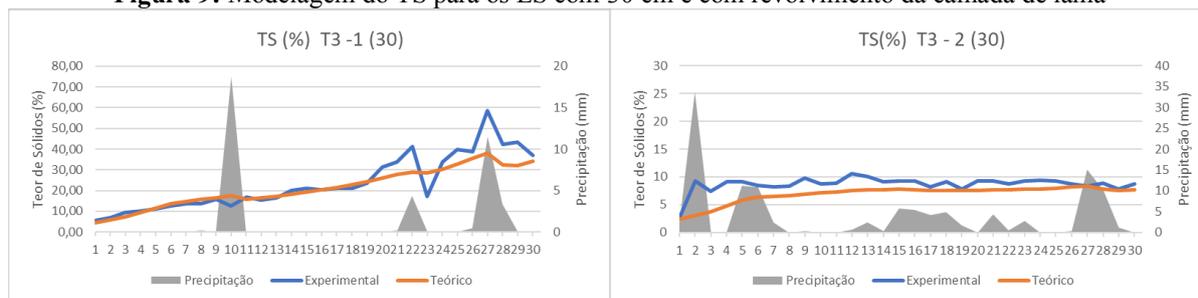
Fonte: Autoria própria

Nota-se uma aproximação das curvas teóricas e experimentais em grande parte do período. Um pico de diminuição de TS, na curva experimental do ciclo 1, acontece após uma precipitação, nos dias 22 e 23. Esse pico não é acompanhado pela curva teórica, principalmente no leito 5. Tal fato acontece, porque em estágios avançados de desidratação, como no dia 22, onde o TS já superava os 50%, a água da chuva é absorvida pelo lodo e evaporada posteriormente. O modelo não prevê esse acúmulo de umidade. Portanto, ao invés de considerar que essa água absorvida fique contida no lodo e se evapore com fator de correção superior ao previsto para o intervalo de TS instantâneo, considera que a mesma seja drenada imediatamente. Assim, não diminui agressivamente o TS após precipitações, porém logo em seguida os valores de voltam a se aproximar.

Observa-se, para o LS 1 no ciclo 2, a maior quantidade de precipitação do período. Como as lamas não atingem valores altos de TS não acontecem grandes variações após queda de chuva.

A Figura 9 mostra os resultados para o LS 3 no ciclo 1 e 2, gráficos do lado esquerdo e lado direito, respectivamente.

Figura 9: Modelagem do TS para os LS com 30 cm e com revolvimento da camada de lama

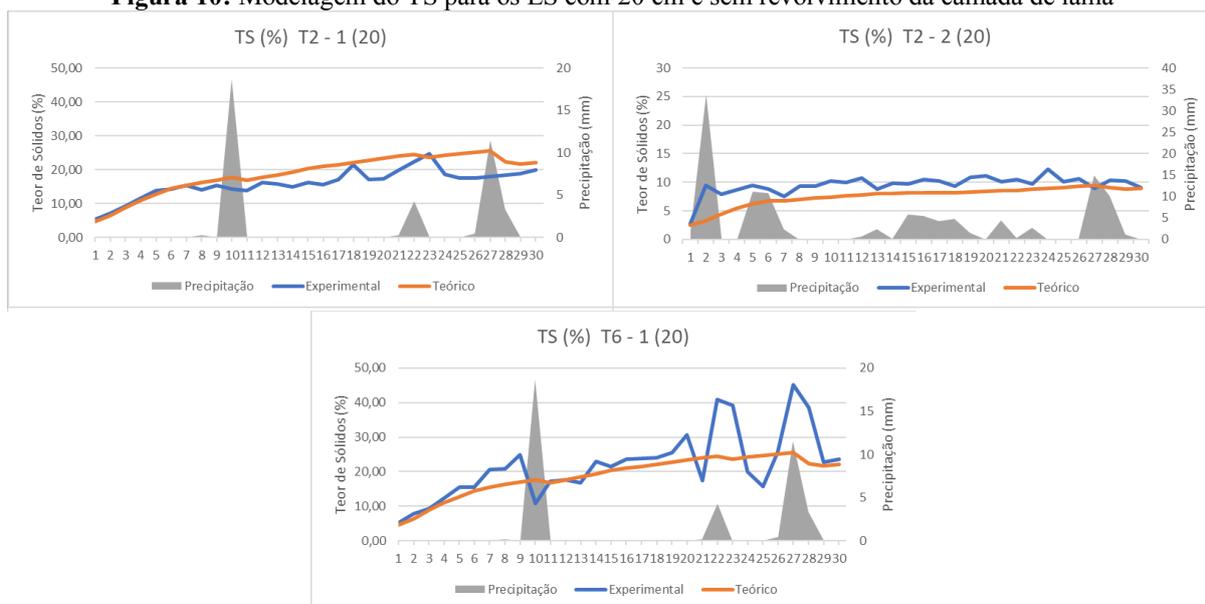


Fonte: Autoria própria

Observa-se uma aproximação das curvas nos dois gráficos, seguindo os mesmos padrões já explicados anteriormente, relativamente à interação do TS com a precipitação.

Para o tratamento T6 – 1 (LS 6 no primeiro ciclo), onde cortiça foi utilizada, houveram maiores valores e também maiores variações nos resultados de TS, como é mostrado na Figura 10. Os gráficos dessa imagem se referem aos leitos com 20 cm e sem revolvimento.

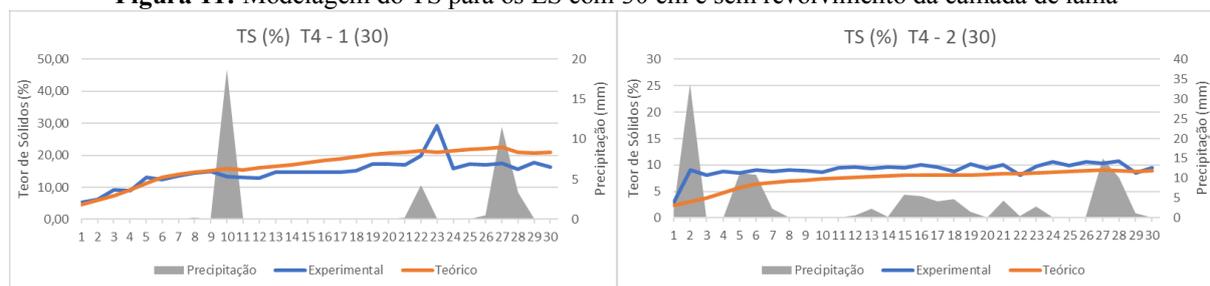
Figura 10: Modelagem do TS para os LS com 20 cm e sem revolvimento da camada de lama



Fonte: Autoria própria

A variação de TS, relativa às chuvas, não seguiram os mesmos padrões para os leitos sem revolvimento. A maioria dos picos de diminuição de TS acontecem nos dias posteriores a precipitação, talvez porque a crosta formada superficialmente dificulte a imediata drenagem da água. Para a última configuração de LS, a Figura 11 mostra os resultados (leitos com 30 centímetros e sem revolvimento).

Figura 11: Modelagem do TS para os LS com 30 cm e sem revolvimento da camada de lama



Fonte: Autoria própria

Como a curva teórica para todos os LS, com mesma configuração, recebia os mesmos fatores de correção, a mudança de valores das mesmas entre os ciclos aconteceu em função das diferenças climáticas e do teor de sólidos inicial das lamas.

Para os leitos onde ocorreram revolvimentos, os resultados foram melhores para os valores de TS e, conseqüentemente, para os de diminuição da espessura da camada de lodo. A modelagem matemática também obteve maior eficiência para esses leitos, visto que acompanhou os valores da curva experimental mais fielmente, principalmente para os leitos com 20 cm.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como esperado, os resultados experimentais da desidratação foram melhores para o primeiro ciclo, onde as temperaturas foram maiores e a precipitação menor. Porém, os LS se mostraram eficientes mesmo em condições climáticas adversas.

Esperava-se a criação de um biofilme na camada de cortiça e que esse biofilme pudesse melhorar a qualidade do lixiviado, porém esse efeito não aconteceu. Talvez se a camada de cortiça fosse colocada abaixo de uma camada de areia não aconteceria a mistura da mesma com o lodo. Pois assim apenas o lixiviado entraria em contato com a cortiça e o biofilme poderia ter sido criado.

A modelação matemática elaborada se comportou bem em diferentes condições climáticas, acompanhando a concentração experimental de TS em praticamente todos os dias do experimento. Um ponto a se melhorar é a maior evaporação da água absorvida nas lamas, relativa à água precipitada, quando o TS se encontra em valores mais elevados. A modelação elaborada não prevê esse fator e o corrige de forma simplista, considerando que essa água fosse drenada.

REFERÊNCIAS

ACHON, C. L.; COIMBRA, P. R. S.; KELLNER, E. **Influência da manta geotêxtil e altura da camada de lodo no desaguamento de lodo anaeróbio em leito de drenagem.** Rio de Janeiro: Eng. Sanit. Ambiental. v. 24, n. 4, p. 849-860, ago. 2019. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019000400849&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 23/04/2021.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 20. ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 1998.

COIMBRA, P. R. S.; ACHON, C. L. **Lodo de reatores UASB: desaguamento através de protótipos de Leito de Drenagem.** Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [S.l.], v. 4, n. 24, dez. 2016. ISSN 2318-8472. Disponível em: <https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/1322>. Acesso em: 23/04/2021.

Cordeiro, J. S. **Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs.** In: REALI, M. A. P. (coord.) **Noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA.** Rio de Janeiro: ABES. p. 107–124, 1999.

Decreto-Lei 276/2009, **2009-10-02 - DRE**, 2009. Disponível em: <<https://dre.pt/pesquisa/-/search/490974/details/maximized>>. Acesso em: 12/04/2021.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

LAMPREIA, E. de C. **Simulação matemática da desidratação de lamas de ETAR em leitos de secagem.** Lisboa: Dissertação de Mestrado, 2017.

LIMA, A.A.J. **Modelação da desidratação de lamas de ETAR por meio de leitos de secagem.** Bragança: Dissertação de Mestrado, 2020.

METCALF and EDDY. **Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización.** 3. ed. Madrid: Tr. McGraw-Hill, 1995.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Conferências de meio ambiente e desenvolvimento sustentável: um miniguia da ONU.** Brasil, 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/conferencias-de-meio-ambiente-e-desenvolvimento-sustentavel-miniguia-da-onu/>>. Acesso em: 10/04/2020.

REALI, M. A. P. **Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs.** In: REALI, M. A. P. (coord.) **Noções gerais de tratamento de disposição final de lodos de ETA.** Rio de Janeiro: ABES. p. 21–39, 1999.

SPERLING, M. Von.; Franci, R. **Lodo de esgotos: características e produção, in Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**, ed. 2001, Belo Horizonte: UFMG, p. 15–65, 2001.



SPERLING, M. Von. **Biological wastewater treatment - volume 1: Wastewater characteristics, treatment and disposal**. Londres: Editora IWA. vol. 45, no. 05, 2007.

TUROVSKIY, I. S; MATHAI, P. K. **Wastewater sludge processing**. Nova Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2006.

www.editorapublicar.com.br
contato@editorapublicar.com.br
[@epublicar](https://www.instagram.com/epublicar)
[facebook.com.br/epublicar](https://www.facebook.com/epublicar)

VARIANTES DO
MEIO
AMBIENTE

Atuação, interdisciplinaridade e Sustentabilidade

ROGER GOULART MELLO
PATRÍCIA GONÇALVES DE FREITAS
ORGANIZADORES



2021

www.editorapublicar.com.br
contato@editorapublicar.com.br
@epublicar
facebook.com.br/epublicar

VARIANTES DO
**MEIO
AMBIENTE:**

Atuação, interdisciplinaridade e Sustentabilidade

ROGER GOULART MELLO
PATRÍCIA GONÇALVES DE FREITAS
ORGANIZADORES



2021