

**NATÁLIA MOLINA FRANCO**

**MANEJO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ÁGUA, VISANDO AO APROVEITAMENTO NA  
AGRICULTURA COMO CONDICIONANTE DE SOLOS**

*Projeto de Pesquisa apresentado à Comissão do Trabalho de Formatura do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro, como parte das exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho de Formatura no ano letivo de 2019”*

Orientadora: Dra. Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales  
Co-Orientadora: Prof. Dra. Dejanira de Franceschi de Angelis

Rio Claro – SP  
2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

NATALIA MOLINA FRANCO

MANEJO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA, VISANDO AO APROVEITAMENTO NA AGRICULTURA  
COMO CONDICIONANTE DE SOLOS

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de  
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP  
2019

*Dedico este trabalho a minha orientadora e co-orientadora e, também a todos os pesquisadores, que de alguma forma buscam soluções para contribuir com o meio ambiente.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por mais esta etapa concluída.

À minha orientadora, Dra. Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales, e co-orientadora, Prof. Dra. Dejanira de Franceschi de Angelis, que aceitaram realizar este trabalho comigo, mesmo eu não tendo muita experiência em laboratório. Agradeço imensamente pela oportunidade, aprendizado e atenção ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao pessoal do laboratório, Dilza, Márcio e João Paulo, por sempre estarem dispostos a me ajudar, pela paciência e por cooperarem com o meu trabalho e aprendizagem.

À toda a minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e incentivo aos estudos, e a minha irmã, pelo companheirismo e pela ajuda nas análises no laboratório aos fins de semana.

Aos diretores, gerentes e operadores do Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Rio Claro - SP (DAAE), os quais colaboraram ao coletarem e doarem as amostras necessárias para a realização deste trabalho. Pessoal sempre disposto a ajudar, sanar as minhas dúvidas e a contribuir com a minha aprendizagem através do estágio de mais de um ano, onde pude conhecer pessoas incríveis que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos diretores, gerentes e operadores da empresa BRK Ambiental de Rio Claro - SP, ao colaborarem com as doações das amostras de resíduo da ETE Conduta.

Ao Prof. Dr. Amauri Antônio Menegário e suas alunas, por ceder espaço em seu laboratório no CEA e pela ajuda com as análises das amostras utilizadas.

Às minhas amigas, Viviane, Cintia, Stephani e Daniela, pelos bons momentos e pela amizade ao longo do curso, a qual levarei para o resto da vida.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê. ”*

*Arthur Schopenhauer*

## RESUMO

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) são responsáveis pela captação, transporte, tratamento e distribuição da água, garantindo o atendimento aos parâmetros de potabilidade. O método de tratamento mais utilizado é do tipo convencional, onde a água passa pelas etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Esse tipo de tratamento gera uma quantidade significativa de resíduos conhecidos como lodo que são provenientes da lavagem dos decantadores e dos filtros. Como, ao longo do tratamento, são usados produtos químicos para a remoção de impurezas da água, o lodo pode apresentar substâncias tóxicas em sua composição e, portanto, deve ter uma disposição final ambientalmente adequada. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de respirometria, a biodegradabilidade de lodo de ETA I do município de Rio Claro/SP quando aplicado ao solo, na ausência ou em associação com material bioestimulante (lodo de esgoto), visando sua utilização na agricultura. Também foi realizada uma caracterização físico-química, microbiológica e do potencial fitotóxico dos diferentes tratamentos contendo solo, lodo de ETA e lodo de esgoto, antes e após o processo de biodegradação. Como resultado, foi possível estimar que a ETA I produz, aproximadamente, 460 ton/ano de lodo, contendo apenas cerca de 15% de sólidos. A relação DQO/DBO indicou a presença de compostos menos biodegradáveis no lodo de ETA, quando comparado ao de esgoto. O ensaio de respirometria revelou que as amostras contendo lodo de esgoto apresentaram a maior produção de CO<sub>2</sub> e eficiência da biodegradação. Nenhum dos tratamentos realizados foi considerado fitotóxico e um aumento significativo do crescimento da raiz foi observado para a maior concentração de lodo de ETA e em associação com lodo de esgoto, após biodegradação. Assim, a adição de lodo de esgoto leva a um aumento do potencial agrônômico da mistura. Desse modo, pelas características apresentadas, o uso do lodo de ETA como condicionante de solo parece ser uma alternativa promissora para o aproveitamento deste resíduo.

**Palavras-chave:** gerenciamento de resíduo; resíduo sólido; lodo de ETA; lodo de esgoto; respirometria; fitotoxicidade

## ABSTRACT

Water Treatment Plants (WTPs) are responsible for the collection, transport, treatment, and distribution of water, ensuring compliance with potability parameters. The most commonly used treatment method is the conventional one, where the water goes through the coagulation, flocculation, decantation, filtration and disinfection steps. This type of treatment generates a significant amount of waste known as sludge that comes from washing the decanters and the filters. As chemicals are used throughout the treatment to remove impurities from water, the sludge may have toxic substances in its composition and therefore must have an environmentally appropriate final disposal. In this context, the present work aimed to evaluate, by respirometry, the biodegradability of WTP I sludge from the municipality of Rio Claro / SP when applied to the soil, in the absence or in association with biostimulant material (sewage sludge), enabling its use in agriculture. A physicochemical, microbiological and phytotoxic potential characterization of the different treatments containing soil, WTP sludge, and sewage sludge was performed before and after biodegradation. As a result, it was estimated that WTP I produces approximately 460 tons/year of sludge, containing only about 15% solids. The COD/BOD ratio indicated the presence of less biodegradable compounds in the WTP sludge when compared to the sewage sludge. The respirometry test revealed that the samples containing sewage sludge presented the highest CO<sub>2</sub> production and biodegradation efficiency. None of the treatments performed were considered phytotoxic and a significant increase in root growth was observed for the highest concentration of WTP sludge and in association with sewage sludge after biodegradation. Thus, the addition of sewage sludge leads to an increase in the agronomic potential of the mixture. Therefore, due to the characteristics presented, the use of WTP sludge as a soil reconditioner seems to be a promising alternative for the use of this residue.

**Keywords:** waste management; solid waste; WTP sludge; sewage sludge; respirometry; phytotoxicity.

NATALIA MOLINA FRANCO

MANEJO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
ÁGUA, VISANDO AO APROVEITAMENTO NA AGRICULTURA  
COMO CONDICIONANTE DE SOLOS

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de  
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau  
de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Dra. Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales (orientadora)

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Dra. Nair Conde de Almeida

Rio Claro, 12 de novembro de 2019.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

## SUMÁRIO

|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                   | <b>10</b> |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>                                                                                     | <b>11</b> |
| 2.1 Objetivo Geral.....                                                                                      | 11        |
| 2.2 Objetivos Específicos .....                                                                              | 12        |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                                        | <b>12</b> |
| 3.1 Definição de lodo e composição de lodo de ETA.....                                                       | 13        |
| 3.2 Caracterização de Lodo de ETA.....                                                                       | 13        |
| 3.3 Lodo de ETE.....                                                                                         | 14        |
| 3.4 Legislação vigente para lodo de ETA no Brasil.....                                                       | 16        |
| 3.5 Legislação vigente para lodo de ETE no Brasil.....                                                       | 17        |
| 3.6 Possibilidades de reaproveitamento do lodo de ETA.....                                                   | 19        |
| 3.7 Impactos do descarte inadequado de lodo de ETA.....                                                      | 21        |
| 3.8 Ensaio de respirometria .....                                                                            | 23        |
| 3.9 Ensaio de fitotoxicidade .....                                                                           | 23        |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                                                           | <b>24</b> |
| 4.1 Caracterização do local de estudo.....                                                                   | 24        |
| 4.1.1 Caracterização da ETA.....                                                                             | 26        |
| 4.1.2 Caracterização da ETE.....                                                                             | 30        |
| 4.2 Cálculo da geração de lodo na ETA I .....                                                                | 33        |
| 4.3 Descrição e Coleta dos materiais .....                                                                   | 34        |
| 4.3.1 Lodo de ETA.....                                                                                       | 34        |
| 4.3.2 Lodo de ETE.....                                                                                       | 35        |
| 4.3.3 Solo .....                                                                                             | 35        |
| 4.4 Determinação do peso seco, cinzas e da quantidade de carbono orgânico total por calcinação em mufla..... | 36        |
| 4.5 Cálculo da Capacidade de Campo .....                                                                     | 37        |
| 4.6 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....                                                                | 38        |
| 4.7 Demanda Química de Oxigênio (DQO).....                                                                   | 39        |
| 4.8 Leitura de pH .....                                                                                      | 40        |
| 4.9 Plaqueamento e contagem de micro-organismos .....                                                        | 40        |
| 4.10 Preparo das amostras .....                                                                              | 41        |
| 4.11 Ensaio de respirometria para avaliação da biodegradabilidade das amostras .....                         | 42        |
| 4.11.1 Construção da reta analítica.....                                                                     | 42        |

|           |                                                                                                  |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.11.2    | Leitura dos respirômetros e avaliação da eficiência da biodegradação...                          | 43        |
| 4.12      | Teste de fitotoxicidade aguda com sementes .....                                                 | 46        |
| 4.12.1    | Preparo dos extratos aquosos (solubilizado) .....                                                | 46        |
| 4.12.2    | Exposição das sementes .....                                                                     | 47        |
| <b>5.</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                              | <b>47</b> |
| 5.1       | Cálculo da geração de lodo da ETA I.....                                                         | 47        |
| 5.2       | Caracterização físico-química das amostras utilizadas nos experimentos .....                     | 51        |
| 5.2.1     | Determinação do peso seco, cinzas, matéria orgânica, carbono total e carbono orgânico total..... | 51        |
| 5.2.2     | Capacidade de campo das amostras .....                                                           | 51        |
| 5.2.3     | DBO, DQO e pH.....                                                                               | 52        |
| 5.3       | Quantificação de bactérias e fungos das amostras .....                                           | 54        |
| 5.4       | Ensaio de respirometria .....                                                                    | 56        |
| 5.4.1     | Construção da reta analítica .....                                                               | 56        |
| 5.4.2     | Quantificação do CO <sub>2</sub> e eficiência da biodegradação.....                              | 58        |
| 5.5       | Teste de fitotoxicidade aguda com sementes .....                                                 | 61        |
| 5.5.1     | Teste de fitotoxicidade aguda com <i>Lactuca sativa</i> (alface) .....                           | 62        |
| 5.5.2     | Teste de fitotoxicidade aguda com <i>Eruca sativa</i> (rúcula) .....                             | 65        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                           | <b>68</b> |
| <b>7.</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                          | <b>69</b> |
|           | <b>APÊNDICES .....</b>                                                                           | <b>78</b> |
|           | <b>APÊNDICE A – MÉDIA DAS MEDIÇÕES DIÁRIAS DO ENSAIO DE RESPIROMETRIA .....</b>                  | <b>79</b> |
|           | <b>APÊNDICE B – MEDIÇÕES DAS SEMENTES GERMINADAS DE ALFACE (<i>Lactuca sativa</i>) .....</b>     | <b>81</b> |
|           | <b>APÊNDICE C – MEDIÇÕES DAS SEMENTES GERMINADAS DE RÚCULA (<i>Eruca sativa</i>) .....</b>       | <b>84</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A população mundial está crescendo e junto com ela a demanda por água potável. Esta é fornecida para a maioria da população urbana pelas Estações de Tratamento de Água (ETAs) que captam, tratam as impurezas presentes nela e a transportam com qualidade, seguindo os parâmetros exigidos pela legislação. No Brasil, a portaria que estabelece os critérios de potabilidade da água para consumo humano é a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Em contrapartida, ao mesmo tempo que o tratamento de água é extremamente benéfico para o ser humano, por fornecer água potável para consumo e para a realização de suas atividades, gera uma quantidade muito grande de resíduos sólidos, inerente ao processo, conhecido como lodo de ETA. De acordo com Ahmad et al. (2016), estima-se que o volume de lodo gerado por uma estação convencional exceda a quantia de 100.000 toneladas por ano.

O lodo em estações de tratamento de água convencionais se forma a partir do uso de substâncias químicas, como coagulantes que agem na limpeza da água, aglomerando as partículas de impurezas. Essas partículas se acumulam nos tanques de decantação e nos filtros que são lavados, eventualmente, dando origem ao lodo (OLIVEIRA; RONDON, 2016).

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o lodo de ETA é considerado um resíduo sólido, sendo classificado como Classe II A, por não ser inerte ou perigoso, podendo ser disposto em aterros sanitários. No entanto, o descarte do lodo em aterros sanitários, muitas vezes é inviável economicamente, uma vez que o desaguamento e o transporte desse resíduo são muito onerosos devido à grande quantidade de água em sua composição. Assim, muitas ETAs optam por lançar esse resíduo diretamente em corpos d'água, podendo causar sérios impactos ambientais (SILVEIRA, 2012). De acordo com o IBGE (2010), cerca de 62% do lodo produzido nas ETAs do Brasil são destinados aos corpos d' água.

Um dos principais impactos dessa prática baseia-se na introdução de metais no ambiente, principalmente ferro e alumínio, em decorrência da adição de coagulantes, como o hidróxi-cloreto de polialumínio e o cloreto férrico, durante o processo de tratamento da água, os quais tendem a se acumular no lodo que será descartado (RITCHER, 2001). Além disso, o lodo de ETA também pode apresentar

contaminantes de características orgânicas, incluindo os contaminantes organohalogênicos e os poluentes emergentes, como pesticidas, hormônios e fármacos (SOTERO-SANTOS; ROCHA; POVINELLI, 2005; MESSIAS, 2013). Assoreamento e alterações nas características físico-químicas da água, como aumento dos sólidos em suspensão, cor e turbidez da água e redução da quantidade de oxigênio dissolvido também são exemplos do impacto negativo que essa prática pode acarretar sobre o corpo hídrico receptor (GASTALDINI et al., 2015).

Para garantir um melhor gerenciamento e uma disposição correta desse resíduo foi criada a Lei 9433/1997- Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) e a Lei 9.605/1998 – Crimes Ambientais (BRASIL, 1998) que considerou o lançamento *in natura* de lodo de ETAs como crime ambiental (SILVEIRA, 2012).

Dessa forma, há uma necessidade eminente no desenvolvimento de estudos que visam destinar adequadamente esse resíduo, oferecendo meios economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis de reciclá-lo. Dentre essas alternativas, destaca-se a incorporação em materiais de construção e cerâmicos, ou mesmo seu uso como condicionante de solos, por este ser rico em elementos minerais e possibilitar a melhoria das características físico-químicas do solo receptor (BABATUNDE; ZHAO, 2007; ODIMEGWU et al., 2018).

Uma vez que o lodo proveniente de ETAs é pobre em matéria orgânica, a sua mistura com outros resíduos, como o lodo de esgoto, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), poderia potencializar o seu uso na agricultura, uma vez que o lodo de esgoto possui maior quantidade de matéria orgânica e quantidades significativas de macro e micronutrientes. Dessa forma, a possibilidade de utilização desses resíduos como aditivo agrícola, obedecendo a legislação vigente, poderia diminuir os impactos ambientais gerados pelo seu descarte incorreto e/ou acúmulo em aterros sanitários, agregando valor a esses resíduos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a biodegradabilidade de lodo de ETA quando aplicado ao solo, na ausência ou em associação com lodo de esgoto, visando sua utilização na agricultura.

## 2.2 Objetivos Específicos

- Estimar a geração de lodo na ETA I, resultante do processo de tratamento de água, e realizar a sua caracterização físico-química;
- Realizar análises de respirometria a fim de compreender a biodegradação de lodo de ETA em diferentes tratamentos com lodo de esgoto e solo;
- Investigar o potencial do uso do lodo de esgoto como um agente estimulador da biorremediação de lodo de ETA, devido, principalmente ao seu alto potencial agronômico e como fonte de micro-organismos;
- Avaliar a fitotoxicidade do lodo de ETA, antes e após o processo de biodegradação, empregando sementes de *Lactuca sativa* (alface) e *Eruca sativa* (rúcula).

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, o tipo de tratamento mais utilizado nas Estações de Tratamento de Água é o convencional, composto pelas etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (SILVEIRA, 2012). Este tratamento tem como objetivo, após a captação de água bruta em corpos d'água, realizar o transporte até a estação e a aplicação de produtos químicos para torná-la potável para o consumo humano, atendendo padrões sanitários exigidos por lei (FONTANA, 2004).

Na primeira etapa do tratamento, que possui uma agitação alta, a adição de coagulante leva as partículas negativas em suspensão presentes na água bruta a reagirem e desestabilizarem-se com a presença de cargas positivas presentes no coagulante, ocasionando a aglomeração dessas partículas (REALI, 1999).

Essas partículas, aglomeradas na etapa de floculação, transformam-se em flocos por meio de uma agitação lenta, onde colidem-se e agrupam-se em tamanhos e densidades maiores. Em seguida, na etapa de decantação, esses flocos, com a ação da gravidade, precipitam-se e acumulam-se nos fundos dos tanques de decantação, levando à clarificação da água. As partículas que não reagiram e não decantaram são encaminhadas para próxima etapa, a filtração, onde, a partir de processos químicos, físicos e biológicos, ocorre a remoção final de impurezas, por intermédio de um meio poroso constituído de materiais como areia, antracito, seixos, entre outros, que possuem granulometrias variadas. Na última parte do tratamento, ocorre a desinfecção, ajuste do pH e fluoretação da água. A desinfecção pode ser

realizada por meio de um agente químico ou físico, como a cloração e a radiação UV, respectivamente (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Ainda segundo esses mesmos autores, dentre as etapas do tratamento convencional, o lodo é o resíduo gerado nos decantadores e na lavagem dos filtros, sendo que a maior massa provém dos decantadores.

### **3.1 Definição de lodo e composição de lodo de ETA**

Os resíduos gerados no tratamento de água são provenientes das impurezas retiradas da água bruta captada, que poderiam gerar malefícios a saúde humana se consumidas. Essas impurezas, retidas e acumuladas durante o tratamento, são chamadas de lodo de ETA, o qual, segundo Silva e Isaac (2002), pode se apresentar em estado líquido ao ser agitado e em estado gel quando em descanso, sendo caracterizado como um fluido não-newtoniano, de grande volume e tixotrópico, ou seja, apresentando alterações em sua viscosidade.

As características quali-quantitativas desse resíduo gerado nas ETAs podem variar de acordo com o processo de tratamento, dependendo desde as características físico-químicas da água de captação, dos tipos e quantidades de coagulantes adicionados, até a frequência de limpeza dos decantadores e dos filtros (RITCHER, 2001).

O lodo de ETA é constituído por diversos tipos de compostos orgânicos e inorgânicos, como: metais, areias, argilas, silte, bactérias, vírus, entre outras partículas que já estavam presentes na água bruta (GRANDIN et al., 1993). Esses resíduos acumulados, segundo Barroso e Cordeiro (2002), correspondem à uma faixa de 1 a 5% do volume total tratado nas ETAs.

A quantidade de lodo formado dependerá da qualidade da água bruta captada, que irá interagir com os produtos adicionados durante o tratamento, resultando em resíduos de massas e volumes diferentes. Além disso também dependerá dos objetivos do tratamento na remoção de impurezas, turbidez e dureza da água (CORNWELL, 2006; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

### **3.2 Caracterização de Lodo de ETA**

A caracterização do lodo de ETA pode ser feita a partir das características físicas, biológicas e químicas desse resíduo. As análises podem ser realizadas de

acordo com o uso ou a destinação que se pretende dar ao lodo. Segundo Scalize (2003), como parâmetros para a caracterização física deste resíduo são analisados: sólidos totais, cor, turbidez, tamanho e distribuição das partículas, densidade e viscosidade, resistência específica e sedimentabilidade.

Para a caracterização química do lodo de ETA, são analisados parâmetros como: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), metais pesados, pH, fósforo e nitrogênio (ASSIS, 2014).

Os métodos mais usados para determinar a quantidade de matéria orgânica em um laboratório são a DBO e a DQO (METCALF; EDDY, 2003). A primeira mede quanto de oxigênio é necessário para que os micro-organismos presentes na amostra realizem a oxidação de toda a matéria orgânica. Entende-se que DQO é a oxidação química da matéria orgânica presente na amostra, através de um oxidante forte como o permanganato ou dicromato de potássio em solução ácida (VON SPERLING, 1996).

A DQO/DBO pode indicar o quanto a amostra pode sofrer degradação biológica, o resultado com valores acima de 2,5 indicam que a amostra não é tão susceptível, uma vez que os valores abaixo de 2,5 indicam maiores chances de a amostra ser degradada biologicamente (DEZOTTI, 2008).

Em relação à presença de metais pesados no lodo de ETAs, os seus valores médios dependem do coagulante utilizado no tratamento, sendo que os metais frequentemente encontrados em lodos provenientes da lavagem de filtros e decantadores são alumínio, ferro, cobre, chumbo, entre outros (KATAYAMA, 2012).

### **3.3 Lodo de ETE**

O lodo de ETE é resultante do tratamento de esgoto nas estações de tratamento, que normalmente são compostas pelas etapas: preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar consiste na separação física dos sólidos mais grosseiros e na remoção de areia, através do gradeamento, peneiração e desarenação (VON SPERLING, 1996).

Em seguida, no tratamento primário, por meio de mecanismos físicos, ocorre a remoção de parte da matéria orgânica presente no esgoto e de sólidos sedimentáveis do fundo dos decantadores primários que dão origem ao lodo primário bruto (MELLO, 2007).

No tratamento secundário, ocorre a remoção da matéria orgânica e de alguns nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Essa remoção é feita em condições aeróbias e anaeróbias, por meio de mecanismos biológicos, sendo os principais: lodo ativado, lagoas de estabilização e filtros biológicos (FEITOSA, 2009).

Na última etapa do tratamento de esgoto são removidos poluentes que não foram retidos nas etapas anteriores, como espuma, cor, sólidos inorgânicos e compostos não biodegradáveis. Neste processo normalmente são utilizados métodos como o de cloração e filtração do efluente antes de desaguá-lo em corpos d'água (TAKAHIDE, 1999).

Nas etapas citadas acima, ocorre a formação do lodo que possui em sua composição compostos orgânicos, inorgânicos e patógenos que foram removidos durante o tratamento do efluente. As suas características dependem das condições físicas, químicas e biológicas do efluente que chega nas estações de tratamento como, por exemplo, a presença de grande quantidade de metais pesados (cádmio, cromo, níquel, chumbo, entre outros) devido à incorporação de efluentes industriais (LUCENA, 2012).

O lodo produzido nas ETEs, resultante da remoção de micro-organismos, areia e sedimentos que estavam em suspensão no esgoto, possui um grande acúmulo de matéria orgânica que ao ser recuperada e tratada, a partir de diferentes tratamentos biológicos ou químicos, passa a ser denominado de biossólido (BEECHER, 2008).

Quanto à produção do lodo de ETE, segundo Soares (2004), estima-se que no Brasil são produzidos cerca de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, sendo que essa estimativa leva em consideração apenas 30% da população urbana que tem coleta e tratamento de esgoto apropriado. Desse modo, este valor tende a aumentar consideravelmente, assim que todos os municípios brasileiros passarem a possuir tratamento de esgoto adequado.

A disposição do lodo de ETE, quando feita de maneira correta, tem seu principal uso na cobertura diária e final de aterros sanitários e, dependendo de sua composição e tratamento, também pode ter usos benéficos, tais como, recuperação de áreas degradadas, telhados verdes, pavimentação, controle de erosão, entre outros (BEECHER, 2008; CHEN; KUO, 2016). Dessa forma, o lodo de esgoto tratado e estabilizado passa de um problema socioambiental e torna-se um produto de utilidade nos setores agrícolas e florestais (FARIA, 2011).

### 3.4 Legislação vigente para lodo de ETA no Brasil

Atualmente, a legislação vigente que rege o saneamento básico no Brasil é a Lei nº 11.445 de 2007. No entanto, grande parte das Estações de Tratamento de Água existentes foram construídas antes da criação de leis que estabeleciam regras para o tratamento e disposição final do lodo. Dessa forma, as estações foram projetadas sem se preocuparem com os resíduos gerados por elas.

Após 1997, começaram a ser implantadas as primeiras leis relacionadas ao gerenciamento de recursos hídricos, às sanções penais e administrativas, às ações lesivas ao meio ambiente, à classificação de resíduos sólidos e licenciamento ambiental para atividades potencialmente poluidoras, tais como: Lei nº 9.433/1997, Lei nº 9.605/1998, Lei nº 12.305/2010 e NBR nº 10.004/2004 e a Resolução CONAMA nº 237/1997 (ACHON; CORDEIRO, 2015).

Os resíduos produzidos nas ETAs, ou seja, o lodo resultante do tratamento de águas é classificado como resíduo sólido pela NBR 10.004/2004, pois o seu teor de sólidos totais varia entre 1 a 4%.

A Lei nº 12.305/2010, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), diferencia rejeitos e resíduos em seu art. 3º, como:

XV - Rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

XVI - Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Ainda, esse mesmo artigo da PNRS define as condições ambientalmente seguras para a destinação e a disposição final desses materiais nos parágrafos:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

VIII - disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

Assim, por se caracterizar como um resíduo e não um rejeito, com potencialidade de reaproveitamento, o lodo não pode ser descartado sem nenhuma forma de gerenciamento, em corpos d'água ou em aterros sanitários, como normalmente vem sendo realizado (ACHON; CORDEIRO, 2015).

O lodo proveniente de ETAs deveria ter a sua redução, reuso e reciclagem priorizados, conforme as diretrizes da PNRS, no entanto, ele muitas vezes é tratado como rejeito e disposto por algumas ETAs diretamente em aterros após o seu desaguamento.

Atualmente, as ETAs devem ter o gerenciamento de resíduos contemplados em seus novos projetos e ampliações, como exigência legal (ACHON; CORDEIRO, 2015).

Quanto à sua aplicação na agricultura, ainda não há legislação específica que regulamente o seu uso.

### **3.5 Legislação vigente para lodo de ETE no Brasil**

O lodo de ETE, assim como o de ETA, também é considerado um resíduo sólido, classificado como Classe II A, podendo ser disposto em aterro sanitário, segundo a NBR 10.004 (2004).

Diferentemente do lodo de ETA, este possui legislações específicas para o seu uso na agricultura, uma vez que sua aplicação é mais vantajosa. Segundo Bettiol e Camargo (2006), o lodo de esgoto pode ser usado como condicionador e fertilizante de solos, pois é um resíduo constituído por uma grande quantidade de matéria orgânica, além de conter macro e micronutrientes.

Estes componentes do lodo de esgoto beneficiam as propriedades do solo, já que, segundo Cesar et al. (2011) e Roig et al. (2012), a sua aplicação melhora as atividades bioquímicas e microbianas do solo, a porosidade, a capacidade de retenção de água, a densidade e a estabilidade de agregados.

Tais benefícios são úteis em regiões onde o solo apresenta níveis baixos de matéria orgânica e de nutrientes, como nas regiões tropicais e subtropicais (BERTON; NOGUEIRA, 2010).

No entanto, nem todo lodo de esgoto está apto para ser usado na agricultura, sendo necessário atender uma série de requisitos impostos pela Resolução CONAMA nº 375/2006 (BRASIL, 2006). Esta resolução regula o uso do lodo na agricultura e veta a utilização de alguns, conforme o seu 1º e 2º parágrafo do 3º artigo:

§ 1º Esta Resolução não se aplica a lodo de estação de tratamento de efluentes de processos industriais.

§ 2º Esta Resolução veta a utilização agrícola de:

I - lodo de estação de tratamento de efluentes de instalações hospitalares;

II - lodo de estação de tratamento de efluentes de portos e aeroportos;

III - resíduos de gradeamento;

IV - resíduos de desarenador;

V - material lipídico sobrenadante de decantadores primários, das caixas de gordura e dos reatores anaeróbicos;

VI - lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma estação de tratamento de esgoto;

VII - lodo de esgoto não estabilizado; e

VIII - lodos classificados como perigosos de acordo com as normas brasileiras vigentes (BRASIL, 2006).

Além dessas exceções, nenhum tipo de lodo de esgoto pode ser utilizado em pastagens e cultivos de culturas onde a parte comestível do alimento entra em contato com o solo, como no caso de olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas (BRASIL, 2006).

As classes de lodos permitidos para serem utilizados devem ser caracterizados segundo os 4 aspectos seguintes: (a) potencial agronômico, (b) substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas, (c) indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos e (d) estabilidade. Esses aspectos avaliam a composição química e microbiológica do resíduo, definindo parâmetros e limites que garantem a segurança de sua aplicação na agricultura, diminuindo os riscos à saúde pública e ao ambiente (BRASIL, 2006).

Os maiores fatores limitantes de seu uso são os metais e a quantidade de patógenos presentes no lodo. Segundo Andreoli et al. (2001), no lodo de esgoto há organismos patógenos, como bactérias, fungos, ovos de helmintos, entre outros, que são prejudiciais a saúde humana e animal, mas podem ser removidos através de tratamentos para redução de patógenos.

Em relação aos metais presentes na composição do lodo, alguns são micronutrientes necessários para as plantas, porém podem haver níveis elevados de

alguns metais e a presença de outros que não são essenciais, sendo fitotóxicos e prejudiciais para a cadeia alimentar (BETTIOL e CAMARGO, 2006; De MELO et al.; 2010). Essa mesma resolução também estabelece limites para a presença de contaminantes orgânicos, como agrotóxicos, fenóis, dioxinas, furanos, entre outros.

Dessa forma, após o lodo de esgoto ser submetido a análises e ser aprovado para uso, a sua aplicação ainda possui algumas restrições, conforme a Seção V, art. 15º do CONAMA 375/2006:

Art. 15. Não será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado:

I - em unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental-APA;

II - em Área de Preservação Permanente-APP;

III - em Áreas de Proteção aos Mananciais-APMs definidas por legislações estaduais e municipais e em outras áreas de captação de água para abastecimento público, a critério do órgão ambiental competente;

IV - no interior da Zona de Transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa, definidos na Portaria DNPM nº 231, de 1998;

V - num raio mínimo de 100 m de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;

VI - numa distância mínima de 15 (quinze) metros de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;

VII - em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse:

a) 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação;

b) 15% no caso de aplicação superficial com incorporação;

c) 18% no caso de aplicação subsuperficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal;

d) 25% no caso de aplicação em covas;

VIII - em parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C;

IX - em áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno; e

X - em áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes. (BRASIL, 2006).

### 3.6 Possibilidades de reaproveitamento do lodo de ETA

Diversas destinações vêm sendo propostas como alternativas ao descarte incorreto de lodo de ETA *in natura* nos corpos d' água, contribuindo para minimizar os impactos gerados ao ambiente. No entanto, segundo o IBGE (2010), esta prática ainda representa o destino final de mais da metade do lodo gerado no Brasil, como apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** - Geração e destinação final dos lodos de ETAs nas diferentes regiões do Brasil

| Distritos com geração de lodo no processo de tratamento de água |                    |                                   |                                 |     |         |                  |             |                  |       |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----|---------|------------------|-------------|------------------|-------|
| Região                                                          | Total de distritos | Nº de distritos geradores de lodo | Destinação final do lodo gerado |     |         |                  |             |                  |       |
|                                                                 |                    |                                   | Rio                             | Mar | Terreno | Aterro Sanitário | Incineração | Reaproveitamento | Outro |
| Norte                                                           | 449                | 84                                | 46                              | -   | 14      | 2                | -           | 3                | 23    |
| Nordeste                                                        | 1.793              | 537                               | 231                             | 5   | 261     | 14               | 1           | 24               | 61    |
| Sudeste                                                         | 1.668              | 896                               | 703                             | -   | 105     | 53               | -           | 10               | 94    |
| Sul                                                             | 1.188              | 442                               | 330                             | 2   | 59      | 11               | -           | 11               | 54    |
| Centro-Oeste                                                    | 466                | 139                               | 105                             | -   | 24      | 3                | -           | 2                | 15    |
| Brasil                                                          | 5.564              | 2.098                             | 1.415                           | 7   | 463     | 83               | 1           | 50               | 247   |

**Fonte:** Adaptado de IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. **Nota:** No processo de tratamento da água, as diferentes regiões do país podem apresentar mais de um destino ao lodo gerado.

Dentre as possibilidades de reaproveitamento desse resíduo, encontram-se sua aplicação na agricultura, a fabricação de tijolos e cimento, a recuperação de coagulantes, o controle de ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) e a melhoria da sedimentabilidade em águas com pouca turbidez (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

Especificamente quanto ao seu uso agrícola, o lodo de ETA pode ser utilizado no cultivo de grama e solo comercial, nas plantações de cítricos, na recuperação de áreas degradadas e em compostagens. A sua aplicação oferece grandes vantagens ao solo, uma vez que possui a capacidade de ajustar o pH, ajudar no aumento da capacidade de retenção de água e nas condições de aeração, melhorando a estrutura do solo, além de conter alguns minerais (TSUTIYA; HIRATA, 2001). Segundo Teixeira et al. (2005), o lodo de ETA também ajuda a elevar os teores de macronutrientes no solo, sendo útil na recuperação de áreas degradadas. De acordo com Padilha (2007), esses macronutrientes presentes no lodo, tais como o cálcio e o magnésio, são elementos importantes no desenvolvimento das plantas.

No entanto, de acordo com Tsutiya e Hirata (2001), a aplicação deste resíduo no solo requer cuidados, pois há metais pesados em sua composição, o que demanda um monitoramento do comportamento desses elementos e dos nutrientes no solo.

A utilização do lodo de ETA na agricultura depende das características desse resíduo, como, por exemplo, o coagulante utilizado durante o tratamento da água. No Brasil, o mais comum é o sulfato de alumínio por apresentar baixo custo, ser de fácil transporte e possuir alta eficácia (FRANCO, 2009). Por outro lado, este tipo de coagulante, segundo McLachlan (1995), prejudica os processos de desidratação do

lodo, dificultando a retirada da água para que o transporte desse resíduo não fique oneroso. Outra desvantagem advinda dos coagulantes, tanto pelo uso de sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) como de cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), é a reação de seus hidróxidos com o fósforo presente no solo, onde pode ocorrer a adsorção desse elemento e o impedimento de sua absorção pelas plantas, prejudicando a produtividade do solo. Porém, de acordo com Feitosa e Consoni (2008), há benefícios em sua utilização no solo, uma vez que este causa um aumento da capacidade de retenção de água, ao torná-lo menos compacto.

Alguns autores consideram desvantajosa a utilização desse tipo de lodo no solo, uma vez que este possui pouca concentração de nutrientes e matéria orgânica. No entanto, ao contrário do lodo de ETA, o resíduo do tratamento de esgoto, o lodo de esgoto possui altas quantidades de matéria orgânica em sua composição e, de acordo com Melo e Marques (2000), algumas pesquisas mostram que este resíduo aumenta a disponibilidade de fósforo no solo. Além disso, o lodo de esgoto também apresenta quantidades significativas de nitrogênio, potássio e de micronutrientes, como cobre, zinco e manganês (MAHDY et al., 2009). Essas características podem complementar os déficits que o lodo de ETA apresenta e, por isso, pode se caracterizar como um material adequado para uma associação, visando a produção de aditivos de solo.

### **3.7 Impactos do descarte inadequado de lodo de ETA**

A disposição incorreta de resíduos de tratamento de água e de esgoto, que geralmente são lançados indevidamente nos corpos d'água, podem gerar desequilíbrios no ambiente.

Segundo Assis (2014), o impacto causado pelo descarte *in natura* de lodo de ETAs em corpos d'água está estritamente relacionado ao tipo de tratamento realizado, dos produtos químicos utilizados, da quantidade de resíduo produzido durante o processo e, também, do método utilizado na lavagem e remoção desse resíduo.

O lodo de ETA descartado sem tratamento prévio no corpo d'água que o recebe pode levar ao aumento da turbidez e de sólidos suspensos, aumento da concentração de metais, diminuição do oxigênio dissolvido, assoreamento dos corpos receptores, alteração da cor, entre outros, podendo causar impactos severos

no ambiente (HOPPEN et al., 2006; OLINGER et al., 2001; DI BERNARDO e DANTAS, 2005; REIS et al., 2007).

De acordo com Messias (2013), as alterações físico-químicas ocasionadas pelo despejo do lodo de ETA, além de contribuir para a degradação das águas e dos sedimentos, também prejudicam a biota aquática, diminuindo processos fotossintéticos, ocasionando obstrução das brânquias e causando a mortandade de organismos mais sensíveis.

Este resíduo também pode afetar o ciclo dos nutrientes, como o do fósforo, ao introduzir grandes quantidades de metais tóxicos no meio aquático, induzindo o surgimento de condições anaeróbias em águas mais lentas, além de aumentar as chances de contaminação dos lençóis freáticos (OLINGER et al., 2001; DI BERNARDO e DANTAS, 2005; REIS et al., 2007). Os metais, mesmo em pequenas quantidades, podem afetar nos corpos d' água a sua capacidade da autodepuração, ao dificultar a decomposição da matéria orgânica pelos micro-organismos. Quanto ao elemento ferro, mesmo não sendo considerado tóxico, este ainda pode causar mudanças na cor e no sabor das águas, afetando a sua qualidade (REALI, 1999; PEREIRA, 2011).

Seu descarte inadequado pode levar também a um aumento da concentração de alumínio, em decorrência do uso de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  como coagulante, o qual, além de não ser biodegradável, e então se acumular no ambiente, pode oferecer riscos à saúde humana, principalmente associados com o aparecimento de casos de Alzheimer, quando utilizado acima do limite permitido (McLACHLAN, 1995).

Ainda, segundo Sotero-Santos, Rocha e Povinelli (2005), tanto a presença de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  como de  $\text{FeCl}_3$  no lodo de ETA induz efeitos crônicos significativos no microcrustáceo *Daphnia magna*, afetando sua taxa de reprodução.

Os corpos d' água também podem ser contaminados por protozoários que ficam retidos no sedimento e resistem ao tratamento, mesmo após à adição do coagulante sulfato de alumínio e da clarificação da água. Scalize (1997) encontrou larvas de *Strongiloides stercoralis*, ovos de *Hymenolepis nana* e cistos de *Entamoeba coli* nas águas de lavagem de filtros, as quais, se descartadas nos corpos d' água, podem comprometer a qualidade da água.

### **3.8 Ensaio de respirometria**

Os ensaios de respirometria têm como objetivo, por meio da medição da geração de CO<sub>2</sub>, avaliar a atividade microbiológica na degradação da matéria orgânica presente na amostra a ser analisada. Este teste também pode indicar qual solo é o mais indicado para a estabilização de resíduos e se há a presença de compostos tóxicos ao afetarem os micro-organismos presentes no solo (NUVOLARI, 1996).

Por meio deste teste, é possível estimar o tempo de estabilização de um resíduo orgânico, sendo que a produção de CO<sub>2</sub> é proporcional a quantidade de matéria orgânica presente no resíduo, uma vez que há um aumento no número de micro-organismos presentes no solo quando uma certa quantidade de matéria orgânica é adicionada. Da mesma forma que, quando a matéria orgânica é consumida e começa a diminuir, a massa biológica também diminui (NUVOLARI, 1996).

Dentre os métodos comumente utilizados é o ensaio de respirometria de Bartha e Pramer (1965). Neste ensaio, o respirômetro possui duas câmeras interligadas em sistema fechado, sendo que na primeira câmera é adicionado o resíduo de interesse misturado com solo e na segunda é adicionado solução alcalina, normalmente, o KOH (hidróxido de potássio). Este teste é baseado na norma da OECD 307 (2002) – “OECD Guideline for the testing of chemicals - Aerobic and anaerobic transformation in soil”.

### **3.9 Ensaio de fitotoxicidade**

Uma forma de avaliar se o lodo de ETA pode ser utilizado, com segurança, na agricultura como condicionante de solos é através de ensaios de fitotoxicidade. Segundo Czerniawska-Kusza et al. (2006), esses ensaios são muito utilizados para avaliações ambientais em solos e sedimentos.

Os testes de fitotoxicidade são realizados com sementes de plantas, como de alface, rúcula, pepino, cevada, entre outras espécies vegetais, caracterizando-se por serem testes econômicos, de resultados visíveis e rápidos, podendo ser utilizados de um a dez tipos diferentes de espécies de plantas (DA MATTA, 2011; USEPA, 1972).

Os resultados destes testes são observados pela germinação das sementes e do crescimento de suas raízes nos primeiros dias de desenvolvimento, sendo

possível visualizar e avaliar os efeitos fitotóxicos nesse período. O crescimento anormal ou a não germinação das sementes indicam a existência de substâncias tóxicas no material analisado que prejudicaram os processos fisiológicos necessários ao correto desenvolvimento das plantas (ZANATTA, 2014).

Os ensaios de fitotoxicidade também são utilizados para identificar se há potenciais ameaças à saúde humana e ao ambiente nas amostras avaliadas (SCHOWANEK et al., 2004).

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

Para avaliar a biodegradabilidade do lodo da ETA, visando sua utilização na agricultura, o trabalho foi dividido em três partes.

Na primeira parte do trabalho foi feito um levantamento bibliográfico visando analisar a aplicação do lodo proveniente de estações de tratamento de água na agricultura, as principais características desse resíduo e como estimar a quantidade produzida. Na sequência, foram escolhidos os locais de estudo, onde foram realizadas visitas para obtenção de informações sobre o método e os produtos utilizados no tratamento, e a coleta de amostras de lodo de ETA e de ETE, para a realização de análises e experimentos.

Na segunda parte do trabalho, foram feitas as análises para a caracterização das amostras coletadas. Em seguida, iniciou-se os experimentos de laboratório com as diferentes amostras de lodo de ETA, misturando outros materiais como solo e lodo de esgoto, para realizar os ensaios de respirometria.

Por fim, foram feitas análises e comparações dos resultados obtidos no experimento, a fim de avaliar se é possível a sua utilização na agricultura, por meio de testes de toxicidade com sementes.

##### **4.1 Caracterização do local de estudo**

Ambas estações de tratamento escolhidas para a coleta de material para a realização das análises e experimentos localizam-se no município de Rio Claro/SP, que está inserido na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos das Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (UGRHI 5), na sub bacia do rio Corumbataí.

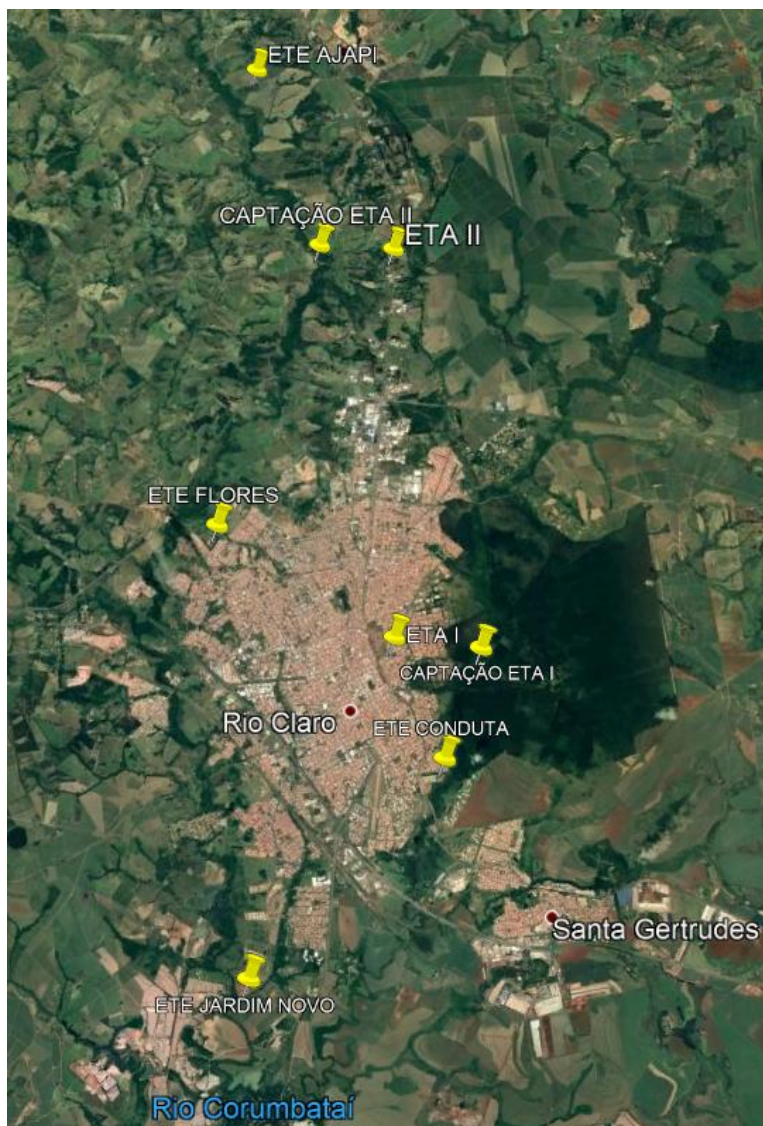
Segundo o último censo do IBGE (2010), o município possuía uma população de 186.253 habitantes e uma densidade demográfica de 373,69 hab/Km<sup>2</sup>, sendo que a população estimada para o ano de 2018 foi de 204.797 habitantes.

O município de Rio Claro possui ao todo duas ETAs e oito ETEs:

- ETA Maria José Pedroso (ETA I)
- ETA José Crespo Filho (ETA II)
- ETE Jardim Palmeiras
- ETE Jardim das Flores
- ETE Jardim Conduta
- ETE Jardim Novo
- ETE Assistência
- ETE Ferraz
- ETE Batovi
- ETE Ajapi

As ETAs realizam captação superficial em corpos d'água, sendo que a ETA I capta no rio Ribeirão Claro e a ETA II no rio Corumbataí, anteriormente à zona urbana. A localização da captação, das ETAs e das ETEs que existem no município estão sinalizadas na Figura 1 abaixo.

**Figura 1-** Localização das ETAs, ETEs e captação da água superficial no município de Rio Claro/SP



Fonte: Google Maps, 2019.

As ETAs e ETEs são de responsabilidade do Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Rio Claro (DAAE), porém devido à uma Parceria Público Privada (PPP) afirmada em 2007, as ETEs passaram a ser administradas pela empresa BRK AMBIENTAL.

#### 4.1.1 Caracterização da ETA

A Estação de Tratamento de Água (ETA) escolhida para a realização dos estudos é denominada ETA José Maria Pedroso, conhecida como ETA I, e localiza-se entre as coordenadas geográficas 22°24'17" S e 47°33'21" W, no município de

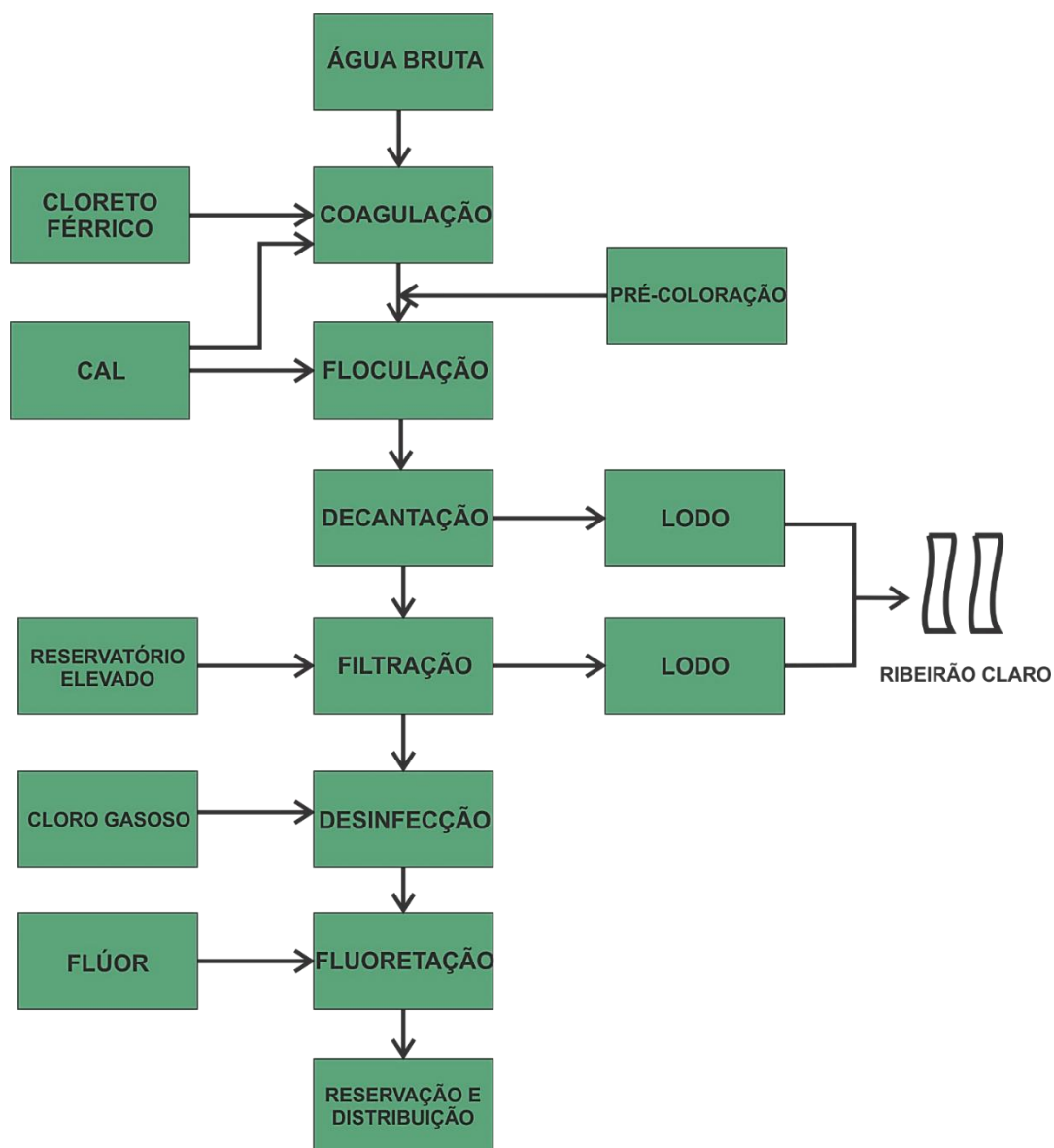
Rio Claro – SP, na Avenida 8A, nº 360 no bairro Cidade Nova, como mostra a figura 2.

**Figura 2-** Imagem de satélite da localização da ETA I



**Fonte:** Google Maps, 2019

A ETA I foi construída em 1947 e ampliada em 1969 para atender a demanda por água, abastecendo cerca de 40 % da população total urbana do município de Rio Claro. Segundo informações fornecidas pelo DAAE, a ETA I realiza o tratamento do tipo convencional (Figura 3) e a distribuição da água potável com uma vazão de 400 L/s e uma produção diária de 25.000 m<sup>3</sup>/dia.

**Figura 3** - Esquema do tratamento da água na ETA I

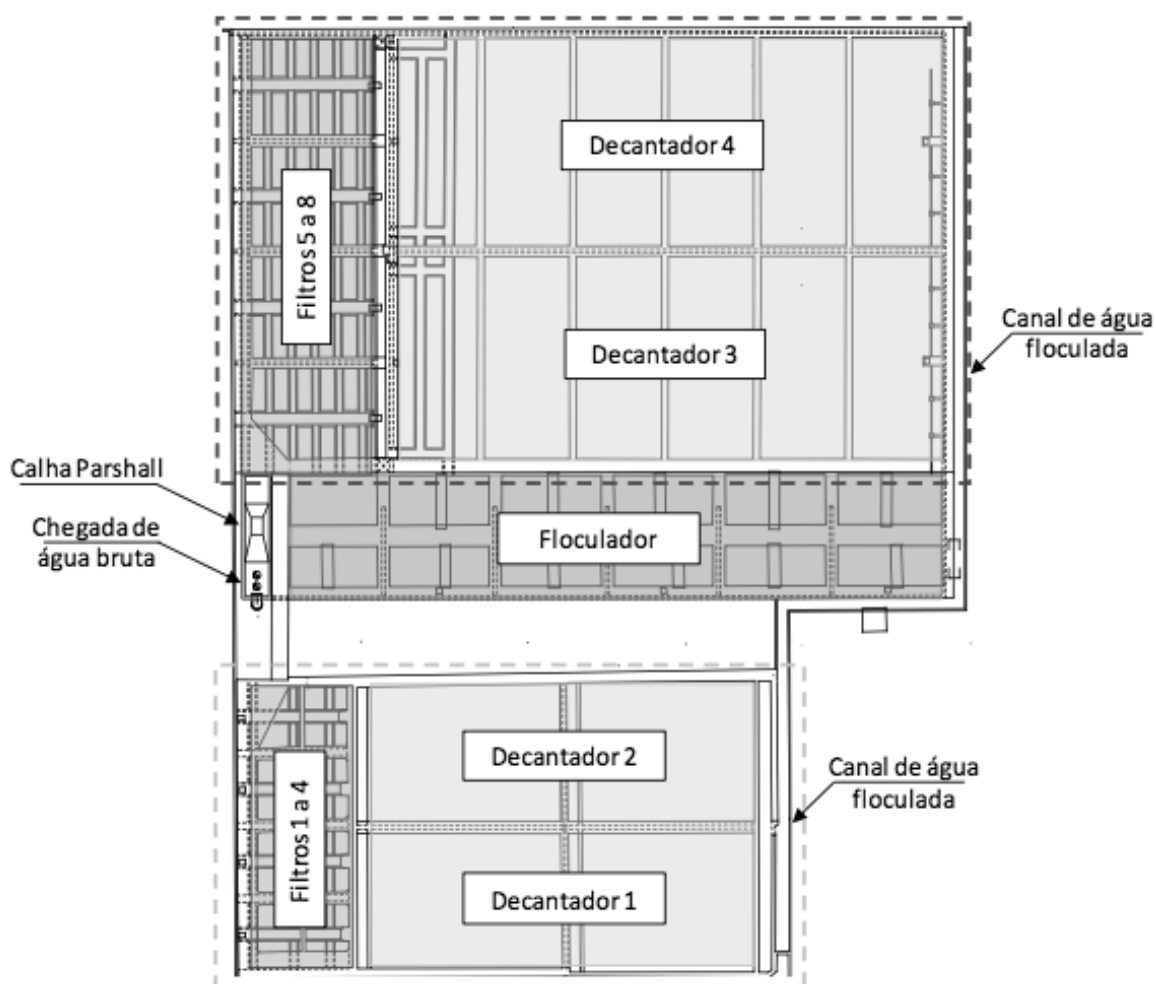
**Fonte:** Adaptado do estudo para o DAAE, SEREC, 2012.

A ETA I é responsável por abastecer o município nos seguintes bairros: Bela Vista, Cidade Nova, Vila Alemã, Santa Cruz, Santana, Centro, Cidade Jardim, Saúde, Copacabana, Bairro do Estádio, Cidade Claret, Vila do Rádio, Jardim Inocoop, Jardim Mirassol, Jardim Novo, Jardim Anhanguera, Jardim Kennedy, Jardim Donângela, Jardim Conduta, Jardim do Trevo, Jardim Nova Veneza, Vila Operária, Vila Paulista, Vila Santo Antônio, Vila do Horto, Consolação, Parque Flórida, São Benedito, Itapuã, bairro Olímpico e Porto Fino.

A captação superficial de água bruta no rio Ribeirão Claro ocorre por meio de 5 adutoras, que se interligam ao longo do percurso até a ETA, sendo que apenas 3 adutoras chegam até a estação. Este corpo d'água é classificado como Classe 2, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2006.

O tratamento convencional é realizado por um floculador mecânico com 6 câmaras com  $168 \text{ m}^3$  cada, quatro decantadores, sendo dois com  $1.843,20 \text{ m}^3$  e outros dois com  $2.016 \text{ m}^3$  cada e 8 filtros de areia sendo quatro com  $102,06 \text{ m}^3$  cada e outros quatro com  $192,78 \text{ m}^3$  cada, como mostra a figura 4.

**Figura 4** – Esquema da planta do tratamento da ETA I



**Fonte:** Adaptado do estudo da HIDROSAN para o DAAE, julho de 2018.

Ao longo do tratamento na ETA I são utilizados diferentes produtos em suas etapas, como mostra a tabela 2.

**Tabela 2** - Produtos usados na ETA I para tratamento da água

| <b>PRODUTO</b>             | <b>USO</b>                                        |
|----------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Cloreto férrico</b>     | Coagulante                                        |
| <b>Cloro gás</b>           | Pré-oxidação e desinfecção                        |
| <b>Ácido Fluossilícico</b> | Fluoração                                         |
| <b>Cal hidratada</b>       | Ajuste do pH de coagulação e correção final do pH |

**Fonte:** Dados fornecidos pelo DAAE, 2019

Quanto à dosagem dos produtos utilizados, esta é feita de acordo com as características e qualidade da água bruta captada, variando em dias de estiagem e em dias chuvosos.

Durante o tratamento de água, são realizadas lavagens em todos os filtros da ETA sequencialmente, uma vez por dia para remover o excesso de impurezas que foram retidas. Por outro lado, os decantadores são lavados a cada um ou dois meses, dependendo das condições de operação da ETA I e das condições climáticas, pois a lavagem é feita manualmente pelos operadores, com o auxílio de mangueiras de alta pressão que utilizam a água de um reservatório instalado na ETA I.

A água de lavagem dos filtros e dos decantadores, assim como os resíduos removidos, como o lodo dos decantadores, são lançados diretamente no corpo d'água, no Córrego Santo Antônio, afluente do rio Ribeirão Claro. O DAAE possui um Termo de Ajuste de Conduta (TAC) que termina no final do ano de 2019, que visa dar um destino ambientalmente correto e mais sustentável ao lodo da ETA I.

#### **4.1.2 Caracterização da ETE**

A Estação de Tratamento de Esgoto do Jardim Conduta (ETE Jardim Conduta) que foi escolhida para realizar a coleta de lodo para o experimento, localiza-se entre as coordenadas 22°25'43"S e 47°32'55"W, na Avenida P 43, número 400, no bairro Jardim Conduta, como mostra a figura 5.

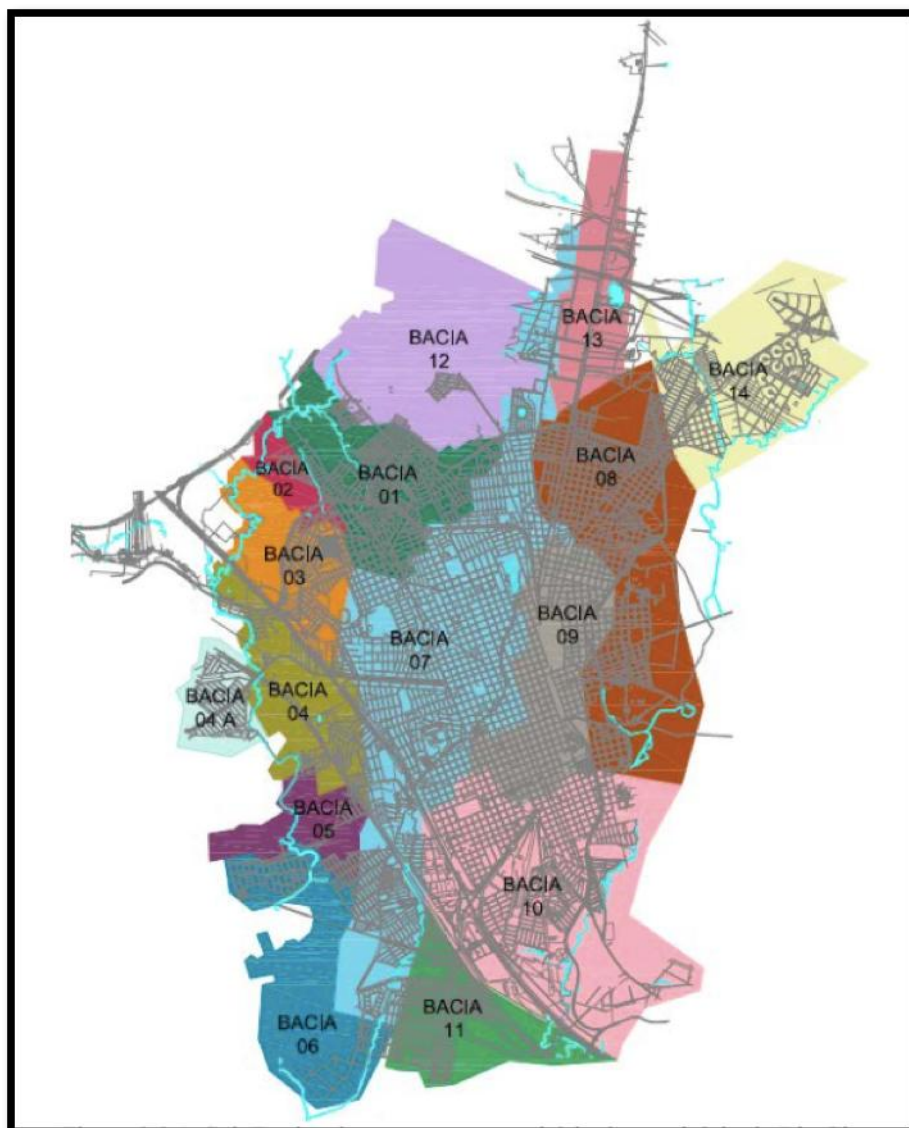
**Figura 5** - Imagem de satélite da localização da ETE Jardim Conduta



**Fonte:** Google Maps, 2018.

Na ETE Jardim Conduta o tratamento realizado é do tipo misto com reator UASB seguido por lodo ativado, com uma capacidade de tratamento média de 160 L/s, o que corresponde a 30,50% do esgoto que é tratado no município. A ETE atende as bacias 8, 9 e 10 do município de Rio Claro, segundo a figura 6 a seguir, o que equivalia a cerca de 78.228 habitantes no ano de 2018.

**Figura 6** - Mapa das sub-bacias de esgotamento sanitário do município de Rio Claro/SP



**Fonte:** Plano Municipal de Saneamento Básico de Rio Claro - SP (Módulo Água e Esgoto), NOVAES Engenharia e Construções EPP, 2010.

Segundo dados fornecidos pela BRK AMBIENTAL de Rio Claro - SP, o lodo resultante do tratamento do esgoto é desaguado na centrífuga, dos quais 75% são destinados no aterro Estre (localizado no município de Paulínia), 18% na empresa TERA para compostagem e cerca de 7% no aterro de Rio Claro. O efluente tratado é desaguado no rio Ribeirão Claro, localizado a cerca de 89 metros de distância da ETE.

## 4.2 Cálculo da geração de lodo na ETA I

Segundo Kyncl et al. (2012), a quantidade de lodo gerado nas estações, pode corresponder a cerca de 2 a 5% do volume de água tratada. Para a realização do cálculo da geração de lodo da ETA onde foi feita a coleta do material para utilização nos experimentos, foi levado em conta as condições estruturais e os produtos utilizados no tratamento da água, como o cal e o coagulante de cloreto férrico. A ETA em questão foi construída há mais de 50 anos e sua estrutura é antiga, dessa forma, foi selecionada uma fórmula empírica para a realização dos cálculos.

A fórmula empírica realiza o balanço de massa dos resíduos produzidos, ao levar em consideração os valores de sólidos suspensos antes e após o tratamento, sendo o mais indicado para ETAs convencionais existentes que utilizam coagulante de sulfato de alumínio ou cloreto férrico, proposta pela American Water Work Association – AWWA (1999). Esta fórmula, segundo Reali (1999), estima que a utilização de 1 g de cal produz 0,1 g de sólidos, 1 g de cloreto férrico produz 0,66 g de sólidos e que cada 1 g de sólidos suspensos produz 1 g de sólido. Com base nessas informações, a equação 1 foi utilizada para o cálculo da produção de lodo na ETA I.

$$W = [(SST_{AB} \times Q_{AB}) + (0,26 \times D_{AS} + 0,1 \times D_{SC}) - (SST_{AT} \times Q_{AT})] \times 0,0864 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

W: Produção de SST (mg massa seca/s)

SST<sub>AB</sub>: Concentração de sólidos em suspensão em mg/L na água bruta;

Q<sub>AB</sub>: Vazão de água bruta em L/s;

D<sub>AS</sub>: Adição diária de coagulante em mg/s;

D<sub>SC</sub>: Adição diária de cal em mg/s;

SST<sub>AT</sub>: Concentração de sólidos em suspensão em mg/L na água tratada;

Q<sub>AT</sub>: Vazão de água tratada em L/s

Os dados utilizados na fórmula foram obtidos por meio da média das medições realizadas na ETA I durante os 9 primeiros meses do ano de 2019, pois estas variaram ao longo dos meses, sendo influenciadas pelo consumo da

população e pelo clima local. Assim, considerou-se uma situação ideal, em que essa média de produção fosse a mesma ao longo dos 12 meses do ano, obtendo-se uma média estimada anual da produção de lodo na ETA I.

Os dados de concentração de sólidos em suspensão foram obtidos pela metodologia apresentada por Cornwell et al. (1987), em que as medições de turbidez são multiplicadas por um fator, que varia entre 1,5 a 2,2, para a sua transformação aproximada em sólidos suspensos.

Para aplicação na fórmula, foram escolhidos os dois valores extremos da variância do fator de Cornwell et al. (1987), a fim de comparar os resultados obtidos entre uma geração menor e maior na produção de sólidos suspensos.

### **4.3 Descrição e Coleta dos materiais**

#### **4.3.1 Lodo de ETA**

O lodo utilizado nos experimentos foi coletado durante uma das lavagens dos decantadores da ETA I (Figura 7), o qual representou um material acumulado por cerca de 1 a 2 meses. As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e direcionadas para o laboratório, onde permaneceram sobre refrigeração (4 °C) até o momento da montagem dos experimentos.

**Figura 7** - Lodo sendo retirado durante a lavagem do decantador da ETA I



**Fonte:** A autora, 2019.

### 4.3.2 Lodo de ETE

As amostras de lodo de ETE foram provenientes da ETE Conduta, representando amostras compostas obtidas em 3 diferentes campanhas que foram realizadas ao longo de uma mesma semana, a fim de garantir a representatividade destas. As amostras foram coletadas em recipientes plásticos, após a passagem do lodo pelo processo de desaguamento em centrífuga.

### 4.3.3 Solo

O solo utilizado para diluição das amostras foi coletado na UNESP, campus Rio Claro, como indicado na figura 8, a seguir.

As tabelas 3 e 4 mostram a caracterização física e química deste solo, a qual foi realizada por laboratório terceirizado (ASL - Análises Ambientais).

**Figura 8** - Indicação do local onde o solo foi coletado na UNESP, Rio Claro - SP



Fonte: Adaptado de Google Maps, 2019.

**Tabela 3** - Composição granulométrica do solo coletado

| COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) |           |           |            |              |        |            |
|-------------------------------|-----------|-----------|------------|--------------|--------|------------|
| Areias                        |           |           |            |              |        | Sub-classe |
|                               | Grossa    | Média     | Fina       | Silte        | Argila |            |
| Diâmetro (mm)                 | 0,6 a 2,0 | 0,2 a 0,6 | 0,06 a 0,2 | 0,002 a 0,06 | <0,002 | Arenoso    |
| Retenção (%)                  | 0,44      | 1,14      | 74,30      | 16,49        | 7,59   |            |
| Incerteza (%)                 | 0         | 0,03      | 6,7        | 0,90         | 0,49   |            |

Fonte: ASL (Análises Ambientais)

**Tabela 4** - Composição de micronutrientes e macronutrientes e condutividade elétrica do solo coletado

| <b>Amostra</b> | <b>MICRONUTRIENTES (mg/Kg)</b> |     |       |       |       | <b>MACRONUTRIENTES (mg/Kg)</b> |     |     | <b>Condutividade elétrica (dS/m)</b> |
|----------------|--------------------------------|-----|-------|-------|-------|--------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|
|                | S                              | Na  | Cu    | Zn    | B     | K                              | Ca  | Mg  |                                      |
| <b>Solo</b>    | <0,255                         | 131 | 23,52 | 24,87 | 19,98 | 308                            | 857 | 377 | 0,623                                |

Fonte: ASL (Análises Ambientais)

#### 4.4 Determinação do peso seco, cinzas e da quantidade de carbono orgânico total por calcinação em mufla

A determinação do teor de carbono orgânico seguiu o protocolo proposto por Goldin (1987), com algumas modificações. Inicialmente, cápsulas de porcelana foram secas por 24 h em estufa a 105 °C, resfriadas em dessecador e taradas. Cerca de 10 g de cada uma das amostras foram colocadas em cápsulas individuais e submetidas a secagem em estufa a 105 °C por 24 h, visando eliminação de toda a água presente. Após esse período, as cápsulas com as amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas para a obtenção do peso seco de cada material. A seguir, as cápsulas com as amostras foram acondicionadas em forno do tipo mufla e incineradas em uma temperatura de 550 °C por 3 h. Posteriormente, as cápsulas foram resfriadas em dessecador e pesadas (Figura 9). O peso final forneceu a porcentagem de cinzas presentes em cada material. Esses ensaios foram realizados em quintuplicata para os lodos e em triplicata para o solo.

O teor de matéria orgânica (MO) das amostras foi determinado pela diferença entre seu peso seco e a massa final do material incinerado (cinzas), dividido pelo seu peso seco. O carbono orgânico total inicial (COT), necessário para se calcular a eficiência da biodegradação, foi obtido a partir da equação  $COT = 0,463 MO - 0,550$ ,

a qual, segundo Carmo e Silva (2012), possibilita a conversão do valor de matéria orgânica obtido pelo método da mufla em carbono total, com precisão.

**Figura 9** – Amostras de lodo de ETA e ETE no dessecador após 24 horas de secagem em estufa a 105 °C



**Fonte:** A autora, 2019.

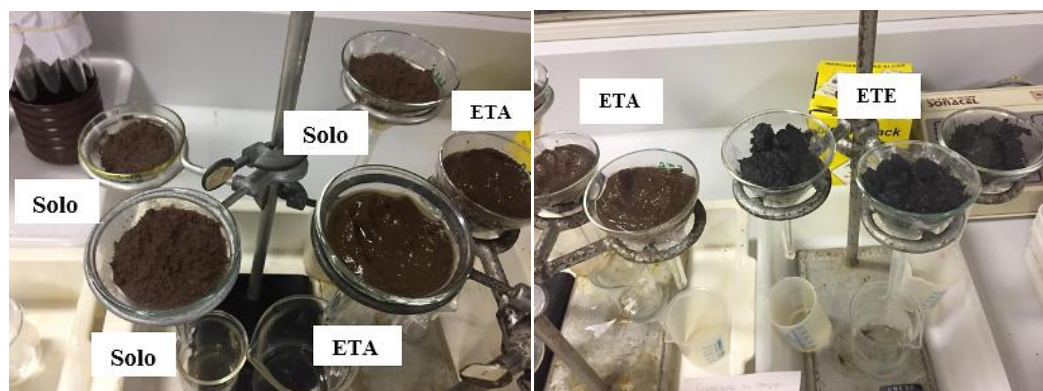
#### 4.5 Cálculo da Capacidade de Campo

O procedimento utilizado para o cálculo da capacidade de campo iniciou-se com o acondicionamento das diferentes amostras em funis contendo algodão em seu interior (figura 10). Em seguida, foi adicionado água nas amostras com o objetivo de saturá-las, até que houvesse passagem da água através do funil. Na sequência, foi feita a selagem da parte superior dos funis, com filme plástico, a fim de evitar perda de água por evaporação.

Após 24 h, foi feita a retirada de cerca de 10g da amostra saturada do funil, para ser pesada em recipiente tarado. Posteriormente, esse material foi colocado em estufa a 105 °C por 24h e, após o seu resfriamento em dessecador, elas foram pesadas novamente.

Por fim, foi feito o cálculo com as diferenças dos pesos iniciais e finais das amostras, considerando a quantidade de água que a própria amostra possuía no momento da coleta (obtida por meio do cálculo do peso seco). Este procedimento foi realizado em triplicata para todas as amostras.

**Figura 10** - Solo, Lodo de ETA e Lodo de ETA nos funis para realização da capacidade de campo desses materiais



Fonte: A autora, 2019.

#### 4.6 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

As análises de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) foram feitas para as amostras de lodo de ETA e de ETE, com base na norma NBR nº 12614 (ABNT, 1992) pelo Método de incubação (20°C, cinco dias), utilizando o método D – Suspensão e incubação com diluição e semeadura, normalmente aplicado a lodos.

Inicialmente, foi preparado um lixiviado adicionando 50 g de cada amostra de lodo em 500 mL de água destilada, seguido por agitação constante por 2 horas. Após decantação, sobrenadante formado de cada amostra foi coletado para uso no ensaio. A semente utilizada foi constituída por pool de micro-organismos biodegradadores provenientes do esgoto doméstico coletado na ETE Jardim das Flores, diluído na proporção de 1 mL de esgoto em 300 mL de água destilada. A água de diluição foi preparada adicionando-se 1 mL de cada uma das soluções: solução-tampão de fosfato, sulfato de magnésio, cloreto de cálcio e cloreto férrico em 1 L de água destilada.

Em frascos âmbar, a fim de bloquear a entrada de luz e assim, evitar a produção de oxigênio pela fotossíntese, foram adicionados 100 µL da semente e 100 mL do lixiviado da amostra, completando o frasco com a água de diluição. O branco (controle) foi preparado do mesmo modo, porém sem a adição do sobrenadante das amostras. Posteriormente, os frascos foram incubados a 20 °C durante 5 dias, na ausência de luz. Após esse período, foi medida a quantidade de oxigênio dissolvido, utilizando-se o oxímetro.

Os resultados obtidos com as medições foram aplicados na equação 2:

$$DBO = \frac{(ODi-OD5)-(ODis-OD5s) \times f}{p \times Q \times T} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

**DBO:** Demanda Bioquímica de Oxigênio, em mg O<sub>2</sub>/L;

**ODi:** Oxigênio dissolvido inicial da amostra em mg/L, determinado antes da incubação;

**OD5:** Oxigênio dissolvido da amostra em mg/L, determinado após cinco dias de incubação a 20°C;

**ODis:** Oxigênio dissolvido inicial da semente em mg/L, obtido através de diluições adequadas e medido separadamente para controle;

**OD5s:** Oxigênio dissolvido da semente em mg/L, após cinco dias de incubação a 20°C, obtido através de diluições adequadas e medido separadamente para controle;

**p:** Fração volumétrica da amostra usada para realizar as diluições;

**f:** Relação entre os percentuais de semente presente na amostra e na semente-controle;

**Q:** Quantidade de lodo úmido com que foi preparada a suspensão, em g/L;

**T:** teor de sólidos do lodo, em g/g.

O resultado obtido com a equação 2 corresponde a DBO da amostra analisada, expressa em mg O<sub>2</sub>/L.

#### 4.7 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

As análises de Demanda Química de Oxigênio (DQO) foram feitas para as amostras de lodo de ETA e de ETE, com base na norma técnica L5.121 (CETESB, 1990) pelo Método da Oxidação por Dicromato de Potássio em Refluxo. Para a realização do ensaio foi escolhido o Método A aplicado em águas poluídas, efluentes industriais e domésticos, com base na oxidação por dicromato de potássio.

Para a realização do ensaio foram preparadas as soluções: ácido sulfúrico contendo sulfato de prata, solução de dicromato de potássio 0,25 N, solução de sulfato ferroso amoniacal 0,25N e solução indicadora de ferroin, de acordo com a norma. Em seguida, em um Erlenmeyer de 250 mL, foi adicionado 0,4 g de sulfato de mercúrio, algumas pérolas de vidro, 10 mL da solução de dicromato de potássio 0,25N e 10 mL do lixiviado das amostras (preparado como descrito no ensaio de

DBO). Na sequência, foi adicionado 15 mL de ácido sulfúrico concentrado gelado, contendo sulfato de prata. Após homogeneização, o Erlenmeyer foi levado ao condensador, onde permaneceu refluxando durante duas horas. Foram preparados 2 Erlenmeyers para cada amostra analisada.

Após resfriamento, lavou-se o condensador com água destilada até que a solução de cada um dos Erlenmeyers apresentasse um volume de, aproximadamente, 100 mL. Logo após, adicionou-se 8 gotas do indicador ferroin e titulou-se o excesso de dicromato de potássio com a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,25N até o seu ponto de viragem (da cor verde para a marrom). O mesmo foi feito para os dois brancos, substituindo a amostra por água destilada.

A partir das medições obtidas com a titulação, foram feitas as médias entre as amostras e entre os brancos, e os valores obtidos foram aplicados na equação 3:

$$DQO = \frac{(V2-V1) \times N \times 8000}{\text{mL da Amostra}} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

**DQO:** Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L O<sub>2</sub>)

**V2:** mL sulfato ferroso amoniacal gasto para titular a prova em branco (precisão ± 0,05 mL)

**V1:** mL sulfato ferroso amoniacal gasto para titular a amostra (precisão ± 0,05 mL)

**N:** Normalidade da solução sulfato ferroso amoniacal

O resultado obtido com a equação 3 refere-se ao valor da DQO da amostra, onde a quantidade de matéria orgânica e inorgânica oxidáveis, expressa como equivalente em oxigênio, é proporcional a quantidade de dicromato de potássio consumida (agente oxidante forte).

#### 4.8 Leitura de pH

Os valores de pH do lodo de ETA e de ETE foram obtidos a partir da leitura dos lixiviados, preparados como descrito no subitem 4.6, em pHmetro de bancada.

#### 4.9 Plaqueamento e contagem de micro-organismos

A presença de bactérias heterotróficas totais foi quantificada pela técnica de pour-plate (plaqueamento em profundidade) em meio PCA (Plate Count Agar). Amostras de 10 g de solo foram adicionadas a 90 mL de solução salina estéril

(0,85%) em enlarmeyers, sendo agitados mecanicamente por 10 minutos. Depois de apropriada série de diluições, 1 mL da solução foi utilizada no plaqueamento em duplicata. As placas de Petri foram mantidas em incubação durante 48 h a 37 °C até a contagem das unidades formadoras de colônia (UFC/g de solo seco).

A presença de fungos foi avaliada pela técnica de spread-plate (espalhamento em superfície) em meio Sabouraud. Amostras de 10 g de solo foram adicionadas a 90 mL de solução salina estéril (0,85%) em enlarmeyers, que foram agitados mecanicamente por 10 minutos. Depois de apropriada série de diluições, 100 µL da solução foi utilizada no plaqueamento em duplicata. As placas de Petri foram mantidas em incubação durante 96 h a 28 °C até a contagem das unidades formadoras de colônia (UFC/g de solo).

O plaqueamento e a quantificação dos micro-organismos foram feitos com as amostras contendo lodo de ETA, ETE e solo, antes de realizar o ensaio de respirometria, e com os tratamentos após o ensaio, para comparação da alteração do crescimento da população microbiana entre os tratamentos e nesses 2 períodos.

#### **4.10 Preparo das amostras**

Anteriormente ao ensaio de respirometria, foram preparados 8 diferentes tratamentos, com base no peso seco de cada material (solo, lodo de ETA e lodo de ETE), da seguinte forma:

- ✓ Controle 1: SOLO
- ✓ Controle 2: SOLO + ETE 5%
- ✓ Tratamento 1: SOLO + ETA 5%
- ✓ Tratamento 2: SOLO + ETA 10%
- ✓ Tratamento 3: SOLO + ETA 15%
- ✓ Tratamento 4: SOLO + ETE 5% + ETA 5%
- ✓ Tratamento 5: SOLO + ETE 5% + ETA 10%
- ✓ Tratamento 6: SOLO + ETE 5% + ETA 15 %

Todos os tratamentos foram feitos em triplicata e receberam a mesma quantia de solo (50 g em massa seca). Esse valor também serviu de base para o cálculo das porcentagens dos demais materiais. Assim, as quantidades do lodo de ETA adicionadas corresponderam à 2,5 g (5%), 5,0 g (10%) ou 7,5 g (15%) de sua massa

seca. Para o lodo de ETE, utilizou-se o valor de 2,5 g (5%) de sua massa seca no preparo do controle 2 e dos tratamentos 4, 5 e 6.

A figura 11 mostra o aspecto dos 3 materiais empregados para o preparo dos tratamentos de respirometria.

**Figura 11** - Materiais: Solo, lodo de ETA e lodo de ETE, respectivamente



Fonte: A autora, 2019.

#### **4.11 Ensaio de respirometria para avaliação da biodegradabilidade das amostras**

##### **4.11.1 Construção da reta analítica**

Anteriormente ao início do experimento de respirometria, foi necessária a construção de uma reta analítica contendo os valores medidos de condutividade de misturas de proporções conhecidas dos reagentes KOH e  $K_2CO_3$ , com molaridade pré-estabelecida, versus a quantidade de  $CO_2$  produzido. Após preparo das soluções, o KOH foi padronizado, por titulação, com uma solução de biftalato de potássio ( $KHC_8H_4O_4$ ), padrão primário utilizado para a padronização de soluções básicas. Não houve necessidade de padronização do  $K_2CO_3$  por este já ser considerado um padrão primário.

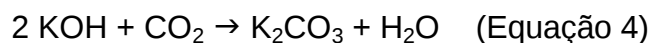
Foram tomadas as leituras de condutividade de 11 soluções, contendo diferentes volumes de KOH 0,25M e  $K_2CO_3$  0,125M, como apresentado na tabela 5. Adicionalmente, 20 mL de  $H_2O$  isenta de  $CO_2$  foram adicionados às soluções a fim de manter as mesmas proporções das utilizadas nas leituras dos respirômetros.

**Tabela 5** - Pontos da reta de calibração utilizada no Ensaio de Respirometria

| KOH 0,25 M (mL) | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 0,125 M (mL) | [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] (μmol) |
|-----------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 10              | 0                                           | 0                                       |
| 9               | 1                                           | 125                                     |
| 8               | 2                                           | 250                                     |
| 7               | 3                                           | 375                                     |
| 6               | 4                                           | 500                                     |
| 5               | 5                                           | 625                                     |
| 4               | 6                                           | 750                                     |
| 3               | 7                                           | 875                                     |
| 2               | 8                                           | 1000                                    |
| 1               | 9                                           | 1125                                    |
| 0               | 10                                          | 1250                                    |

Fonte: A autora, 2019.

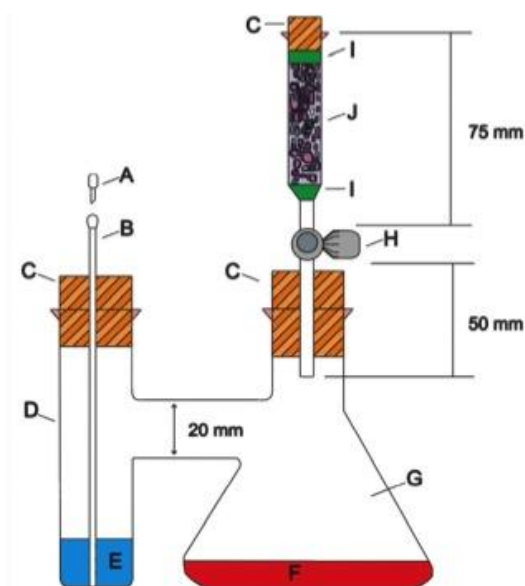
A equação de regressão linear gerada foi utilizada para transformar a condutividade da amostra em μmol de CO<sub>2</sub> produzido, considerando que pela reação do CO<sub>2</sub> com o KOH, cada mol de CO<sub>2</sub> produz um mol de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Equação 4).



#### 4.11.2 Leitura dos respirômetros e avaliação da eficiência da biodegradação

A biodegradabilidade das diferentes amostras foi avaliada pela técnica de respirometria proposta por Bartha e Pramer (1965), onde foram utilizados respirômetros (Barthas) para medir a produção microbiana de CO<sub>2</sub> e a quantidade de carbono degradado (Figura 12).

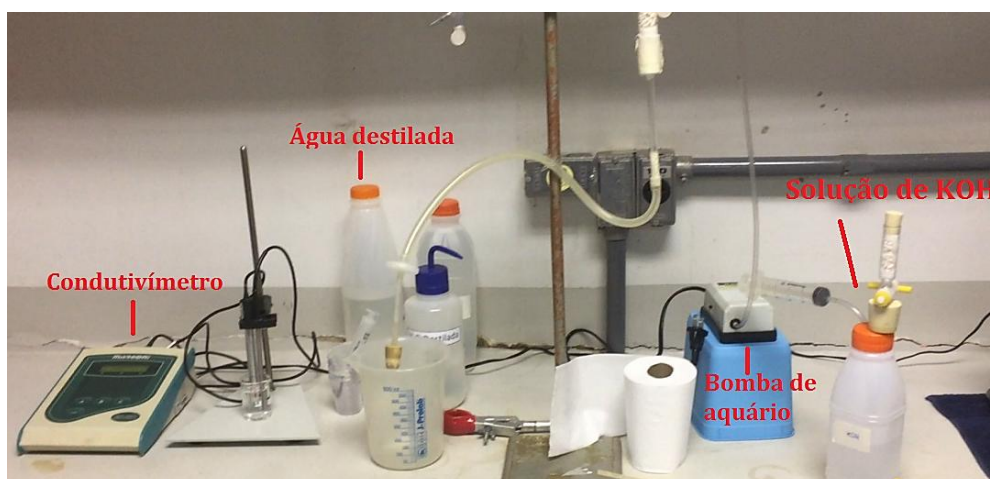
**Figura 12** - Esquema de um respirômetro do ensaio de respirometria de Bartha e Pramer (1965). A: Tampa da cânula; B: Cânula (diâmetro de 1 a 2 mm); C: Rolha de borracha; D: Braço lateral (diâmetro de 40 mm; altura de 100 mm); E: Solução de KOH; F: Amostra; G: Frasco erlenmeyer (250 mL); H: Válvula; I: Suporte (lã de vidro); J: Filtro de cal sodada (diâmetro de 15 mm; altura de 40 mm).



Fonte: Montagnolli et al. (2009)

Para os experimentos respirométricos, foram preparados frascos em triplicata (3 x 50 g de solo seco) contendo os diferentes tratamentos, os quais foram incubados a 28 °C no escuro. O CO<sub>2</sub> produzido foi capturado pela solução de KOH (10 mL; 0,25 N), localizada no braço lateral do respirômetro. Esta solução foi periodicamente retirada com o auxílio de uma seringa e os respirômetros foram aerados durante 1 minuto através dos filtros de cal sodada, para renovação do oxigênio (Figura 13).

**Figura 13** - Foto dos equipamentos e materiais utilizados nas medições do ensaio de respirometria



Fonte: A autora, 2019.

A quantidade de gás carbônico absorvida foi medida por um método eletroquímico a partir de leituras de condutividade (Strotmann et al., 2004). Este método baseia-se no fato de que a solução de hidróxido de potássio é convertida em uma solução de carbonato de potássio, devido à captura do dióxido de carbono. Como a condutividade de uma solução é proporcional à concentração dos eletrólitos nela presente, é possível estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> produzido pela microbiota e fixado na solução de KOH, na forma do íon carbonato, pela medida da condutividade nesta solução alcalina.

A equação a seguir mostra que, a medida que o sistema captura mais CO<sub>2</sub>, ocorre um aumento da quantidade de sal e uma diminuição na condutividade da solução, assim, uma correlação linear pode ser estabelecida entre esses dois parâmetros.

$$\Lambda_m = 10^3 \text{ k} / c \text{ (Equação 4), onde:}$$

$\Lambda_m$ : condutividade molar

k: condutância padrão do analito

c: concentração molar

O experimento foi realizado por um período de 63 dias, sendo finalizado após declínio e estabilização da taxa de produção de CO<sub>2</sub> diário em todos os tratamentos.

A produção total de CO<sub>2</sub>, no final do experimento, foi utilizada para estimar a quantidade total de compostos orgânicos mineralizados, seguindo a metodologia de cálculo para a eficiência de biodegradação (EB), tendo como referência a equação:

$$EB\% = \frac{\text{Total de carbono biodegradado na amostra } (\mu\text{mol})}{\text{Quantidade de carbono orgânico inicial na amostra } (\mu\text{mol})} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Uma vez que 50% do carbono biodegradado é convertido à CO<sub>2</sub> e a outra metade é adicionada ao solo como húmus e biomassa, o total de carbono biodegradado é referente ao dobro da quantia de CO<sub>2</sub> produzida. A quantidade de carbono inicial foi mensurada como descrito no subitem 4.4.

## 4.12 Teste de fitotoxicidade aguda com sementes

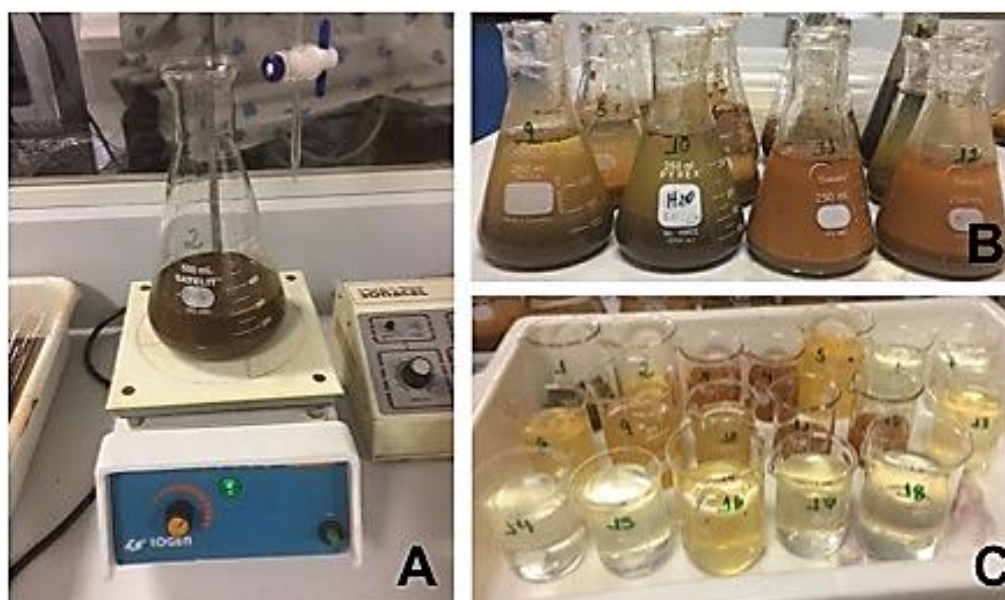
### 4.12.1 Preparo dos extratos aquosos (solubilizado)

Anteriormente à realização do teste de toxicidade, foram preparados extratos aquosos de todos os tratamentos das amostras iniciais e finais do ensaio de respirometria (Figura 14). Para a obtenção desses extratos, seguiu-se a norma NBR 10.006 (ABNT, 2004), que estabelece os critérios para o preparo de solubilizados a partir de resíduos sólidos, como segue:

- Mistura de 125 g de cada uma das amostras (massa seca) em 500 mL de água ultrapura;
- Agitação constante por 5 minutos;
- Repouso da solução por 7 dias para decantação do material em suspensão;
- Coleta do sobrenadante (parte líquida), contendo as substâncias solúveis em água.

Tratando-se de materiais altamente higroscópicos, para o lodo da ETA e para o da ETE, foi adicionado 1,5 X e 2 X o volume utilizado nos demais tratamentos, a fim de obter o sobrenadante.

**Figura 14** - Procedimentos para obtenção dos extratos aquosos das amostras. **A.** Amostra submetida ao procedimento de homogeneização em agitador magnético; **B.** Amostras em repouso para a decantação do material em suspensão; **C.** Extratos aquosos (solubilizado) dos diferentes tratamentos, apresentando variação na coloração.



Fonte: A autora, 2019.

#### 4.12.2. Exposição das sementes

O teste de fitotoxicidade foi realizado com sementes de alface (*Lactuca sativa*) e rúcula (*Eruca sativa*), seguindo os procedimentos propostos por Sobrero e Ronco (2004). Foram germinadas 10 sementes de cada espécie em placas de Petri individuais, contendo cada um dos diferentes tratamentos. O controle negativo (CN) foi realizado com água destilada e o controle positivo (CP) com sulfato de zinco heptahidratado (0,005 M -  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). Posteriormente, as placas foram incubadas em BOD, na ausência de luz, por um período de 120 h (cinco dias), a uma temperatura de  $22 \pm 2$  °C. O experimento foi realizado em triplicata, para cada um dos tratamentos, antes e após serem submetidos ao processo de biodegradação. Após a incubação, foram realizadas as medições do hipocótilo e da radícula de cada uma das sementes germinadas, com o auxílio de uma régua. Os valores obtidos foram comparados estatisticamente com o controle negativo por meio do teste Kruskal-Wallis, a 0,05 de nível de significância.

Para avaliar alterações no efeito fitotóxico de cada amostra, em decorrência de sua biodegradação, foram comparados, estatisticamente, os resultados obtidos para cada tratamento, antes e após o ensaio de respirometria, utilizando o teste Mann-Whitney, a 0,05 de nível de significância.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 Cálculo da geração de lodo da ETA I

Para a realização do cálculo estimado da produção de lodo nos decantadores da ETA I, utilizou-se os dados fornecidos pelo DAAE referentes aos 9 primeiros meses do ano de 2019. Os valores fornecidos foram transformados para as unidades adequadas, requeridas para a realização do cálculo, a partir da Equação 1.

Os valores de sólidos suspensos foram obtidos com base nos valores de turbidez, pois não haviam registros desses dados na ETA I. Dessa forma, os dados de turbidez foram transformados em sólidos suspensos ao serem multiplicados pelo fator 1,5, (tabela 6), e, também, pelo fator 2,2 (tabela 7).

**Tabela 6** - Valores da produção de lodo da ETA I, calculados utilizando o fator de conversão de 1,5 para sólidos suspensos

| Parâmetro                       |                      | Unidade | Meses        |          |          |          |          |        |        |        |          |
|---------------------------------|----------------------|---------|--------------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|----------|
|                                 |                      |         | Jan          | Fev      | Mar      | Abr      | Mai      | Jun    | Jul    | Ago    | Set      |
| TAB                             | Turbidez Bruta       | mg/L    | 25,07        | 63,36    | 60,00    | 37,85    | 15,70    | 10,20  | 8,90   | 8,00   | 14,00    |
| TAT                             | Turbidez Tratada     | mg/L    | 0,44         | 0,47     | 0,44     | 0,42     | 0,39     | 0,29   | 0,27   | 0,35   | 0,41     |
| SSTAB                           | Água Bruta (X 1,5)   | mg/L    | 37,61        | 95,04    | 90,00    | 56,78    | 23,55    | 15,30  | 13,35  | 12,00  | 21,00    |
| SSTAT                           | Água Tratada (X 1,5) | mg/L    | 0,66         | 0,71     | 0,66     | 0,62     | 0,59     | 0,44   | 0,41   | 0,53   | 0,62     |
| Produção de SST (Lodo)          |                      | mg/s    | 1.813,92     | 3.242,14 | 3.182,43 | 2.213,79 | 1.259,85 | 972,29 | 937,26 | 905,20 | 1.190,40 |
| Produção de SST (Lodo)          |                      | ton/mês | 4,70         | 8,40     | 8,25     | 5,74     | 3,27     | 2,52   | 2,43   | 2,35   | 3,09     |
| Produção total (Lodo)           |                      | ton     | 40,74 ± 2,29 |          |          |          |          |        |        |        |          |
| Média da produção mensal (Lodo) |                      | ton/mês | 4,53 ± 0,25  |          |          |          |          |        |        |        |          |
| Média da produção anual (Lodo)  |                      | ton/ano | 54,32 ± 3,00 |          |          |          |          |        |        |        |          |

**Nota:** SSTAB: Concentração de sólidos em suspensão em mg/L na água bruta; SSTAT: Concentração de sólidos em suspensão em mg/L na água tratada; SST: sólidos em suspensão

**Fonte:** A autora, 2019

**Tabela 7** - Valores da produção de lodo da ETA I, calculados utilizando o fator de conversão de 2,2 para sólidos suspensos

| Parâmetro                       |                      | Unidade | Meses        |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---------------------------------|----------------------|---------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                 |                      |         | Jan          | Fev      | Mar      | Abr      | Mai      | Jun      | Jul      | Ago      | Set      |
| TAB                             | Turbidez Bruta       | mg/L    | 25,07        | 63,36    | 60,00    | 37,85    | 15,70    | 10,20    | 8,90     | 8,00     | 14,00    |
| TAT                             | Turbidez Tratada     | mg/L    | 0,44         | 0,47     | 0,44     | 0,42     | 0,39     | 0,29     | 0,27     | 0,35     | 0,41     |
| SSTAB                           | Água Bruta (X 2,2)   | mg/L    | 55,15        | 139,39   | 132,00   | 83,27    | 34,54    | 22,44    | 19,58    | 17,60    | 30,80    |
| SSTAT                           | Água Tratada (X 2,2) | mg/L    | 0,97         | 1,03     | 0,97     | 0,91     | 0,86     | 0,64     | 0,59     | 0,77     | 0,90     |
| Produção de SST (Lodo)          |                      | mg/s    | 2.250,62     | 4.282,35 | 4.133,94 | 2.805,77 | 1.499,15 | 1.127,28 | 1.076,41 | 1.030,91 | 1.416,89 |
| Produção de SST (Lodo)          |                      | ton/mês | 5,83         | 11,10    | 10,72    | 7,27     | 3,89     | 2,92     | 2,79     | 2,67     | 3,67     |
| Produção Total (Lodo)           |                      | ton     | 50,86 ± 3,15 |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Média da produção mensal (Lodo) |                      | ton/mês | 5,65 ± 0,35  |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Média da produção anual (Lodo)  |                      | ton/ano | 67,82 ± 4,20 |          |          |          |          |          |          |          |          |

SSTAB: Concentração de sólidos em suspensão em mg/L na água bruta; SSTAT: Concentração de sólidos em suspensão em mg/L na água tratada; SST: sólidos em suspensão

**Fonte:** A autora, 2019.

A produção total de lodo apresentada, anteriormente, nas tabelas foi conseguida através da somatória das produções dos nove meses considerados. A média da produção mensal foi obtida dividindo-se a produção total de lodo pelo número de meses computados (9 meses). Já para a obtenção da produção anual de lodo, considerou-se uma situação ideal, onde todos os meses do ano tivessem essa mesma média de produção de sólidos.

A partir dos resultados das tabelas 6 e 7, nota-se que a aplicação do fator 2,2 resulta em aumento de mais de 10 toneladas ( $\pm 24\%$ ) de lodo seco por ano, quando comparado ao valor calculado para o fator 1,5. Além disso, ao comparar os meses de contribuição, os de fevereiro e março se destacam na produção de sólidos, provavelmente devido à uma frequência maior de chuvas nesse período (Tabela 8), o que aumenta a turbidez da água dos rios.

O aumento no número de partículas em suspensão, também induz o aumento na dosagem dos produtos químicos utilizados pela ETA, acarretando na produção de maior quantidade de lodo nesses meses. O inverso também pode ser visualizado para os meses com menor quantidade de chuvas, como junho, julho e agosto, nos quais houve menores produções de lodo. Assim, observa-se que as precipitações influenciam na qualidade da água bruta, uma vez que as chuvas arrastam material particulado para dentro dos rios, principalmente, se este não possuir mata ciliar para proteger suas margens, aumentando a turbidez da água e, portanto, levando à uma maior geração de lodo decorrente do seu tratamento.

**Tabela 8** - Dados pluviométricos do ano 2019, fornecidos pelo DAAE

| Meses     | Índice pluviométrico (mm) |
|-----------|---------------------------|
| Janeiro   | 118,90                    |
| Fevereiro | 382,00                    |
| Março     | 209,40                    |
| Abril     | 205,60                    |
| Maiο      | 28,00                     |
| Junho     | 0,00                      |
| Julho     | 20,60                     |
| Agosto    | 11,70                     |
| Setembro  | 49,30                     |

Fonte: A autora, 2019.

A partir dos dados de produção anual de lodo seco, referente aos dois diferentes fatores, foram obtidos os valores estimados de produção mínima (54,32 ton) e máxima (67,82 ton). Ao se fazer a média desses valores, obtêm-se uma produção estimada de cerca de 61,07 ton/ano de lodo seco, ou seja, o lodo puro sem água. Assim, ao se utilizar os dados da caracterização do lodo da ETA I, feitos anteriormente, onde a porcentagem de matéria seca deste resíduo é de cerca de 13,29%, foi possível estimar a média anual de produção de lodo úmido, a qual correspondeu, aproximadamente, a 459,52 ton/ano. Embora esse valor esteja muito aquém da quantia de 100.000 ton/ano descrita por Ahmad et al. (2016), esse valor estimado parece condizer com a realidade da ETA I, uma vez que esta apresenta uma planta antiga e trata água para apenas 40% da população do município de Rio Claro.

## 5.2 Caracterização físico-química das amostras utilizadas nos experimentos

### 5.2.1 Determinação do peso seco, cinzas, matéria orgânica, carbono total e carbono orgânico total

A tabela 9 mostra os resultados obtidos para o solo, o lodo de ETA e o lodo de ETE quanto aos seus pesos seco, cinzas, matéria orgânica, carbono total e carbono orgânico total.

**Tabela 9** - Caracterização do solo, lodo de ETA e lodo de ETE empregados neste estudo

| Amostra     | Matéria Seca (%) | Cinzas (%)       | MO (%)           | CT (%)           | COT (%)          |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Lodo de ETA | 13,2898 ± 0,3541 | 81,6651 ± 0,5212 | 18,3349 ± 0,5827 | 10,6351 ± 0,3380 | 7,9391 ± 0,2698  |
| Lodo de ETE | 16,7388 ± 0,8463 | 28,3684 ± 1,5442 | 71,6316 ± 1,7264 | 41,5497 ± 1,0014 | 32,6154 ± 0,7993 |
| Solo        | 88,5183 ± 0,0315 | 80,8511 ± 0,5276 | 2,1522 ± 0,0816  | 1,2484 ± 0,0473  | 0,4465 ± 0,0378  |

MO: matéria orgânica; CT: carbono total; COT: carbono orgânico total

Fonte: A autora, 2019.

A caracterização físico-química dos materiais indicou que lodo de ETA e de esgoto são constituídos em grande parte por água (86% e 83%, respectivamente), enquanto que no solo, a água correspondia a apenas 11% de sua massa.

Quanto à massa seca, para o lodo de ETA e o solo, a quantidade de cinzas representou a maior parte desta, sendo superior a 80%, o que indica o caráter mineral desses materiais. Por outro lado, o lodo de ETE tem a maior parte constituída por matéria orgânica (cerca de 71%), comprovando alta concentração desse componente, como já descrito por outros autores (BETTIOL; CAMARGO, 2006; MAHDY et al., 2009). Pelos resultados aqui obtidos, registra-se que o lodo de ETE possui quantidade considerável de carbono orgânico total, com uma concentração cerca de 70 vezes superior à do solo. Embora o lodo de ETA tenha apresentado uma quantidade inferior à do lodo de ETE, esta correspondeu a um valor cerca de 18 vezes maior que a do solo. Assim, ambos lodos representam matéria orgânica em quantidade suficiente para o crescimento microbiano.

### 5.2.2 Capacidade de campo das amostras

De acordo com Veihmeyer e Hendrickson (1931), o termo “capacidade de campo” refere-se ao volume máximo de água que um solo consegue reter depois

que o excesso de água tenha sido drenado por percolação. Os resultados obtidos para este parâmetro estão apresentados na tabela 10.

**Tabela 10** - Valores obtidos para a capacidade de campo dos diferentes tratamentos

| Nº | TRATAMENTOS            | Capacidade de Campo (%) | Quantidade de Água (g) | Matéria Seca (g) | Matéria Úmida (g) |
|----|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------|
| 1  | Solo + 5% ETE          | 65,66                   | 18,82                  | 52,50            | 56,37             |
| 2  | Solo +5% ETA + 5% ETE  | 78,50                   | 35,15                  | 55,00            | 71,48             |
| 3  | Solo +5% ETE + 10% ETA | 84,54                   | 51,47                  | 57,50            | 75,20             |
| 4  | Solo +5% ETE + 15% ETA | 88,05                   | 67,80                  | 60,00            | 94,03             |
| 5  | Solo + 5% ETA          | 74,09                   | 22,71                  | 52,50            | 112,84            |
| 6  | Solo + 10% ETA         | 83,47                   | 39,04                  | 55,00            | 90,31             |
| 7  | Solo + 15% ETA         | 88,05                   | 55,36                  | 57,50            | 109,14            |
| 8  | Solo                   | 43,91                   | 6,39                   | 50,00            | 127,95            |

Fonte: A autora, 2019.

Sabe-se que o ajuste de umidade das amostras é importante para a realização do ensaio de respirometria, a qual deveria estar em uma faixa entre 60 – 70% da capacidade de campo. No entanto, como pode ser visualizado na tabela 10, os tratamentos 3, 4, 6 e 7, que continham pelo menos 10% lodo de ETA, apresentaram alta quantidade de água em sua composição, ultrapassando a faixa ideal de umidade. Assim, para a adequação desses tratamentos dentro dessa faixa, haveria a necessidade da realização de processos de desidratação, os quais poderiam acarretar em uma perda da quantidade e diversidade de micro-organismos autóctones, já adaptados a essas condições. Além disso, para a aplicação desses materiais em solo, em larga escala, a necessidade de uma etapa adicional (desidratação) poderia tornar essa prática mais custosa e menos interessante. Desse modo, optou-se por trabalhar com o valor de 80% da capacidade de campo para os tratamentos 1, 2, 5 e 8 e manter a umidade real dos tratamentos 3, 4, 6 e 7.

### 5.2.3 DBO, DQO e pH

Os resultados dos ensaios de DBO, DQO e pH estão apresentados na tabela 11.

**Tabela 11** - Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e pH das amostras de lodos coletadas.

| Amostra             | DBO (mg/L) | DQO (mg/L) | DQO/DBO | pH   |
|---------------------|------------|------------|---------|------|
| Lodo da ETA I       | 1.160      | 3.000      | 2,59    | 6,87 |
| Lodo da ETE Conduta | 1.665      | 2.500      | 1,50    | 6,50 |

**Fonte:** A autora, 2019.

O despejo de resíduos em corpos d'água com valores elevados de DBO pode comprometer a qualidade da água, principalmente, por levar a uma depleção dos níveis de oxigênio (PENN; PAUER; MIHELICIC, 2009). Como pode ser visto na tabela 11, os resultados mostram que o lodo de esgoto possui uma DBO, aproximadamente, 30% maior que a do lodo de ETA, evidenciando a sua maior quantidade de matéria orgânica biodegradável, quando comparado ao lodo de ETA. No entanto, pelos valores obtidos para ambos lodos, pode-se supor que o descarte desses resíduos seja altamente detrimental para o corpo hídrico receptor, uma vez que estão bem acima dos valores médios para efluentes de esgoto doméstico (120 – 500 mg O<sub>2</sub>/L) e alguns efluentes industriais (300 – 800 mg O<sub>2</sub>/L) descritos na literatura (DEZOTTI, 2008).

Quanto aos resultados do ensaio de DQO, registra-se que o lodo de ETA apresentou um resultado maior que o lodo de esgoto, cerca de 16%, indicando que este apresenta uma fração maior de substâncias não biodegradáveis, provavelmente devido a maior quantidade de constituintes inorgânicos, como, por exemplo, os produtos químicos utilizados no tratamento da água.

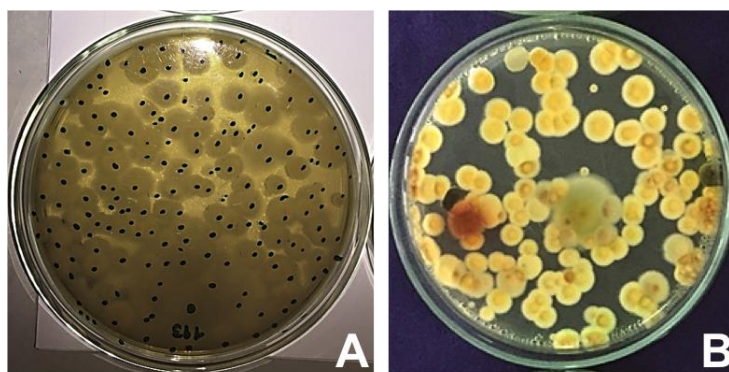
A relação DQO/DBO traz informação sobre a biodegradabilidade das amostras. Assim, observa-se que, quando comparado ao lodo de ETE, o lodo de ETA apresenta uma maior quantidade de substâncias recalcitrantes. Contudo, embora o lodo de esgoto seja mais susceptível a biodegradação, a relação DQO/DBO de ambos lodos encontram-se próxima à faixa proposta por Dezotti (2008) para efluentes compostos em maior parte por substâncias biodegradáveis (1,5 a 2,5). Tal fato indica que tanto o lodo de ETA como o lodo de ETE podem sofrer degradação microbiana como a que ocorre no experimento de respirometria. Ainda, segundo essa mesma autora, apenas valores acima de 5 indicariam a presença de materiais exclusivamente inertes.

Em relação ao pH das amostras, ambas encontram-se próximas à faixa neutra, o que não implica em comprometimento quando descartados no ambiente.

### 5.3 Quantificação de bactérias e fungos das amostras

A contagem de micro-organismos das amostras foi realizada antes e após o ensaio de respirometria (Figura 15), e os resultados estão apresentados nas tabelas 12 e 13.

**Figura 15** - Placas de Petri com crescimento de micro-organismos. **A.** Exemplo de uma placa para contagem de bactérias heterotróficas contendo meio PCA; **B.** Exemplo de uma placa para contagem de fungos contendo meio Sabouraud.



**Fonte:** A autora, 2019.

**Tabela 12** - Contagem de bactérias heterotróficas totais nos diferentes tratamentos, antes e após o ensaio de respirometria (UFC/g amostra seca)

| TRATAMENTO              | BACTÉRIAS HETEROTRÓFICAS |                      |                            |
|-------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------------|
|                         | Tempo inicial            | Tempo final          | Alteração (%) <sup>a</sup> |
| SOLO                    | $6,6200 \times 10^6$     | $1,0255 \times 10^6$ | 84,51 <                    |
| SOLO + ETE 5%           | $1,2034 \times 10^8$     | $1,3293 \times 10^6$ | 98,90 <                    |
| SOLO + ETA 5%           | $6,7233 \times 10^6$     | $4,4270 \times 10^5$ | 93,42 <                    |
| SOLO + ETA 10%          | $6,8266 \times 10^6$     | $4,4242 \times 10^5$ | 93,52 <                    |
| SOLO + ETA 15%          | $6,9299 \times 10^6$     | $5,4300 \times 10^5$ | 92,16 <                    |
| SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | $1,2044 \times 10^8$     | $1,6307 \times 10^6$ | 98,65 <                    |
| SOLO + ETE 5% + ETA 10% | $1,2054 \times 10^8$     | $1,4507 \times 10^6$ | 98,80 <                    |
| SOLO + ETE 5% + ETA 15% | $1,2064 \times 10^8$     | $1,3882 \times 10^6$ | 98,85 <                    |

<sup>a</sup> Valor, em porcentagem, da diminuição do número de bactérias dos tratamentos no período final em relação ao inicial

**Fonte:** A autora, 2019.

**Tabela 13** - Contagem de fungos nos diferentes tratamentos, antes e após o ensaio de respirometria (UFC/g amostra seca)

| TRATAMENTO              | FUNGOS               |                      |                            |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
|                         | Tempo inicial        | Tempo final          | Alteração (%) <sup>a</sup> |
| SOLO                    | $3,3669 \times 10^4$ | $1,1515 \times 10^5$ | 241,99 >                   |
| SOLO + ETE 5%           | $2,4577 \times 10^6$ | $6,6124 \times 10^7$ | 2590,48 >                  |
| SOLO + ETA 5%           | $3,5150 \times 10^4$ | $9,4809 \times 10^3$ | 73,03 <                    |
| SOLO + ETA 10%          | $3,6631 \times 10^4$ | $5,0564 \times 10^3$ | 86,20 <                    |
| SOLO + ETA 15%          | $3,8110 \times 10^4$ | $1,3713 \times 10^4$ | 64,02 <                    |
| SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | $2,4587 \times 10^6$ | $1,7356 \times 10^4$ | 99,29 <                    |
| SOLO + ETE 5% + ETA 10% | $2,4601 \times 10^6$ | $9,4421 \times 10^5$ | 61,62 <                    |
| SOLO + ETE 5% + ETA 15% | $2,4616 \times 10^6$ | $9,5394 \times 10^3$ | 99,61 <                    |

<sup>a</sup> Valor, em porcentagem, da alteração da quantidade de fungos (aumento ou diminuição) dos tratamentos no período final em relação ao inicial

**Fonte:** A autora, 2019.

A quantificação dos micro-organismos antes do ensaio de respirometria mostra que os materiais utilizados representam fontes consideráveis de micro-organismos. Assim, optou-se por não adicionar um inóculo único a todos os tratamentos, mas sim, realizar a biodegradação com os micro-organismos autóctones de cada material, a fim de manter as características microbiológicas mais próximas do resíduo original.

A contagem de bactérias heterotróficas, no período inicial, revelou valores superiores aos de fungos, variando em uma faixa de  $10^6$  a  $10^8$  UFC (Unidades Formadoras de Colônias). A contagem dos fungos variou entre  $10^4$  e  $10^6$ . Como esperado, o solo apresentou os menores valores de micro-organismos, tanto para a contagem de bactérias como de fungos. A incorporação de lodo de ETA ao solo promoveu apenas um aumento sutil no número de UFCs. No entanto, a adição de lodo de esgoto contribuiu para um incremento de duas ordens, de  $10^6$  para  $10^8$  para as bactérias e,  $10^4$  para  $10^6$ , para os fungos, indicando ser um material muito rico em micro-organismos. Outros autores também concluíram que a aplicação de lodo de esgoto ao solo favorece significativamente o aumento da população microbiana, tanto em quantidade como em diversidade (MAZZEO et al., 2015; SOMMAGGIO et al., 2018).

Os resultados da contagem de micro-organismos também possibilitaram comparar a quantidade microbiana de cada tratamento, antes e após a biodegradação, indicando se houve aumento ou diminuição dos mesmos. Após o

ensaio de respirometria, foi observada uma diminuição entre 84% a 98% da presença de bactérias heterotróficas para todos os tratamentos, quando comparados com o período inicial. Segundo Orzi et al. (2015), um decréscimo na população microbiana ao longo do processo de biodegradação indica que houve diminuição da fonte de carbono disponível inicialmente nas amostras. Os tratamentos que tiveram a maior diminuição foram os que continham lodo de esgoto, sendo o solo o que apresentou a menor diminuição, como apresentado na tabela 12. Um decréscimo na contagem total de bactérias heterotróficas em amostras de lodo de esgoto, após um período de biodegradação, também foi observado por outros autores (MAZZEO et al., 2015; SOMMAGGIO et al., 2018), estando relacionadas, possivelmente a uma diminuição por competição por recursos e diminuição no número de bactérias patogênicas (SCAGLIA et al., 2014; SMITH et al., 2005). Além disso, a contagem de UFC, obtida nas amostras do período final, indicou que houve uma estabilização da população bacteriana em todos os tratamentos por apresentarem valores similares ao do solo.

Quanto aos fungos, estes também sofreram uma diminuição ao final do experimento em todos os tratamentos, provavelmente em decorrência do esgotamento da fonte de nutrientes. Para esses tratamentos, houve uma diminuição entre 73% a 99% em relação ao período inicial. As exceções foram os controles SOLO e SOLO + ETE 5%, onde houve aumento superior a 200% e 2000%, respectivamente, como observado na tabela 13, o que indicou que para esses tratamentos ainda havia fonte de alimento para os fungos isolados nessas amostras.

Outro fato interessante é que o lodo de ETA quase não contribuiu para um aumento da quantidade de fungos, uma vez que, como pode ser visualizado na tabela 13, os valores iniciais dos tratamentos que apresentavam apenas solo e lodo de ETA foram muito próximas ao tratamento controle que só continha solo. Esta verificação indica que o lodo de ETA pode não apresentar condições adequadas para o crescimento fúngico, por exemplo, em termos de nutrientes e oxigenação. Ou, ainda, conter em sua composição substâncias que inibam o crescimento de fungos, possivelmente, relacionado aos produtos químicos adicionados na ETA ao longo do tratamento da água.

## **5.4 Ensaio de respirometria**

### **5.4.1 Construção da reta analítica**

A tabela 14 traz os resultados da medição de condutividade das soluções padrões que foram utilizadas para traçar a reta analítica.

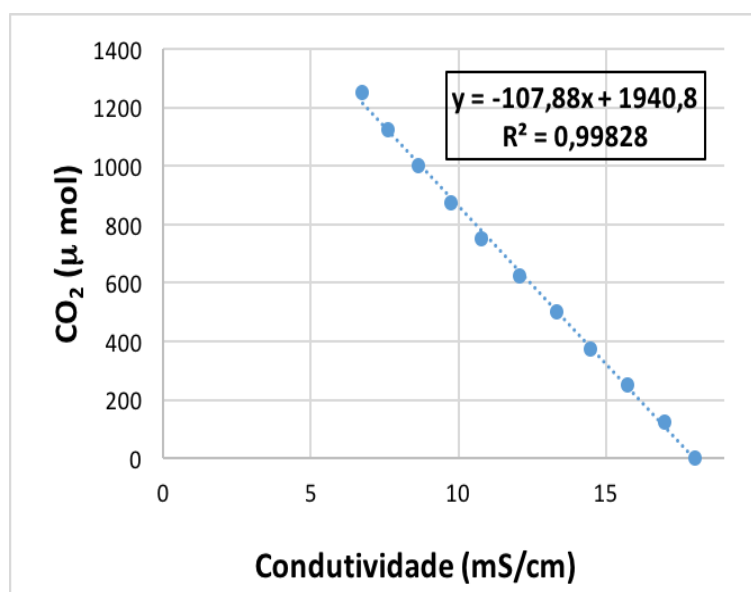
**Tabela 14** - Pontos da reta de calibração utilizada no ensaio de respirometria

| KOH 0,25 M (mL) | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 0,125 M (mL) | [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] (μmol) | Condutividade (mS/cm) |
|-----------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|
| 10              | 0                                           | 0                                       | 18,03                 |
| 9               | 1                                           | 125                                     | 17,00                 |
| 8               | 2                                           | 250                                     | 15,73                 |
| 7               | 3                                           | 375                                     | 14,48                 |
| 6               | 4                                           | 500                                     | 13,33                 |
| 5               | 5                                           | 625                                     | 12,06                 |
| 4               | 6                                           | 750                                     | 10,79                 |
| 3               | 7                                           | 875                                     | 9,74                  |
| 2               | 8                                           | 1000                                    | 8,66                  |
| 1               | 9                                           | 1125                                    | 7,61                  |
| 0               | 10                                          | 1250                                    | 6,74                  |

**Fonte:** A autora, 2019.

A partir da plotagem dos valores de condutividade obtidos foi possível traçar a reta analítica e, assim, obter a equação que foi utilizada para a quantificação do CO<sub>2</sub> produzido no estudo de respirometria (Figura 16).

**Figura 16** - Curva analítica de CO<sub>2</sub> em função da condutividade em solução de KOH. Concentrações em cada ponto, segundo a tabela 14.

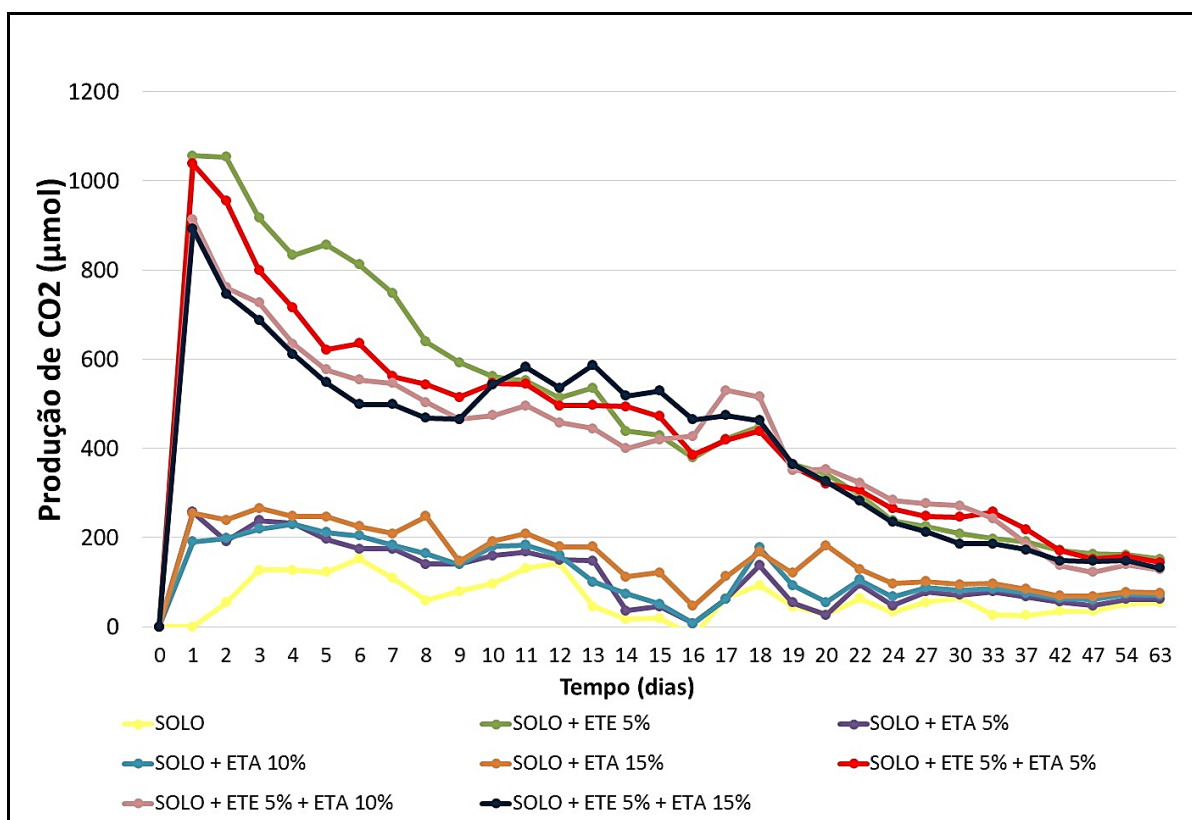


**Fonte:** A autora, 2019.

### 5.4.2 Quantificação do CO<sub>2</sub> e eficiência da biodegradação

Os resultados relativos à quantificação de CO<sub>2</sub> diária, durante os 63 dias de experimento, estão apresentados na figura 17. Verifica-se que os tratamentos tiveram comportamentos diferentes ao longo do ensaio. Os tratamentos que continham lodo de ETE apresentaram uma produção máxima de CO<sub>2</sub> logo no primeiro dia do experimento. Enquanto os demais tratamentos tiveram seus maiores valores entre o terceiro e quarto dia. No entanto, observou-se que não houve fase de adaptação em nenhum dos tratamentos, indicando que estes forneciam condições favoráveis de crescimento à biomassa microbiana presente. Tal fato pode ser justificado pelo uso de micro-organismos indígenas, já pré-adaptados, o que pode favorecer o processo de biodegradação (Chandra; Kumar, 2017).

**Figura 17** - Produção de CO<sub>2</sub> diária observada nos ensaios de respirometria



Fonte: A autora, 2019.

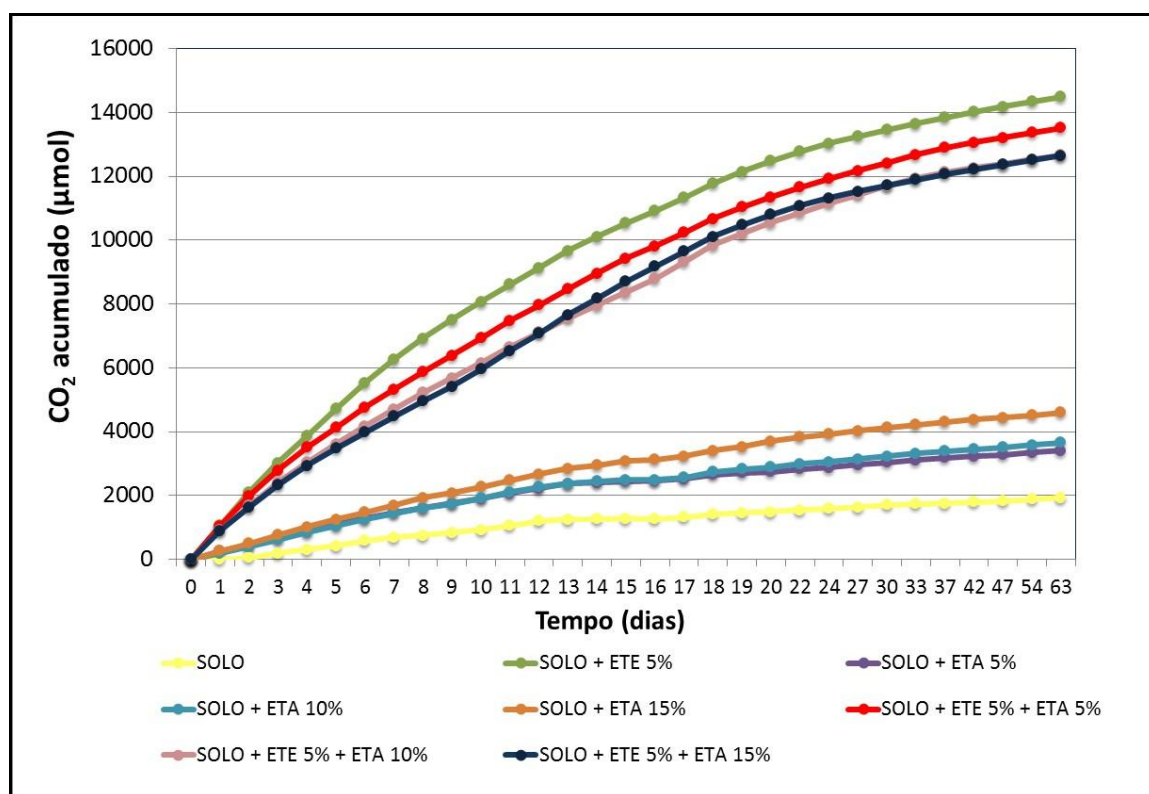
Além disso, a presença de lodo de esgoto nas amostras também levou a índices mais elevados de produção de CO<sub>2</sub> durante todo o ensaio de respirometria. Esses valores mais altos fizeram com que as leituras tivessem que ser feitas

diariamente, até o vigésimo dia de experimento, a partir do qual, elas puderam ser espaçadas para 2, 3, 4 e 5 dias, até completar os 63 dias de experimento.

Os valores de produção diária de  $\text{CO}_2$  (Figura 17) também informaram o período de encerramento da biodegradação quando a quantidade de  $\text{CO}_2$  produzida por todos os tratamentos passou a ser constante, por isso, as leituras foram encerradas com 63 dias.

A produção acumulada de  $\text{CO}_2$  referente à somatória dos 63 dias de incubação está apresentada na figura 18. Como esperado, o menor valor foi observado para o solo (controle), uma vez que essa amostra continha a menor quantidade de matéria orgânica e o menor número de micro-organismos. Contudo, o outro controle utilizado nesse experimento (SOLO + ETE 5%) apresentou os maiores níveis de produção de  $\text{CO}_2$ , superiores até mesmo aos tratamentos, provavelmente pelo fato da quantidade inicial de bactérias e fungos e de carbono orgânico disponível serem mais elevadas.

**Figura 18** - Produção acumulada de  $\text{CO}_2$  mensurada durante os ensaios de respirometria



**Fonte:** A autora, 2019.

Quanto aos tratamentos, aqueles que continham apenas lodo de ETA apresentaram um comportamento similar, de modo que a quantidade de lodo de

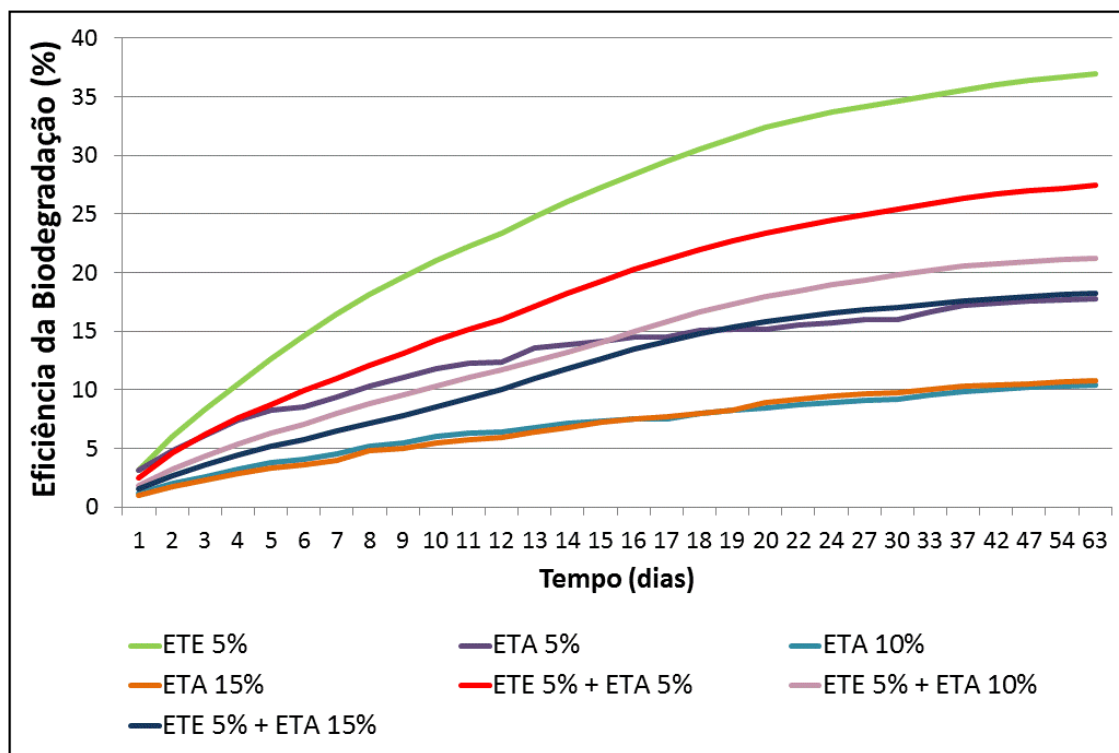
ETA presente pouco interferiu na produção de CO<sub>2</sub>. Apenas um leve aumento foi observado para o SOLO + ETA 15%, em relação aos demais. Os tratamentos que, além de lodo de ETA, também continham lodo de ETE, mostraram uma produção de CO<sub>2</sub> inversamente proporcional à porcentagem de lodo de ETA presente.

Assim, nas figuras 17 e 18, fica claro que a presença de lodo de esgoto nos tratamentos induz um aumento na produção de CO<sub>2</sub>, sendo, desse modo, mais biodegradáveis que os demais tratamentos. De acordo com Fiúza et al. (2004), as medidas de CO<sub>2</sub> produzidas por cada respirômetro pode ser diretamente relacionada à taxa de biodegradação das amostras. Portanto, como o lodo de esgoto é um resíduo rico em matéria orgânica, macronutrientes e micronutrientes (MAHDY et al., 2009), ele atuou como um agente estimulante do processo de biodegradação das amostras.

A figura 19 traz os valores da eficiência de biodegradação do lodo de ETA, em termos de assimilação de carbono, por parte dos micro-organismos, na presença ou ausência do lodo de esgoto. A partir dessa figura foi possível verificar que, em termos de eficiência da biodegradação, um aumento na proporção de lodo de ETA no solo acarreta em uma diminuição da eficiência, indicando a presença de compostos mais difíceis de serem biodegradáveis. Além disso, também introduz às amostras uma maior quantidade de compostos minerais, uma vez que o lodo de ETA apresenta uma quantidade mais elevada de cinzas do que o lodo de esgoto, como registrado no item 5.2 (Tabela 9), o que pode implicar em uma maior dificuldade à degradação microbiana.

Adicionalmente, também foi possível visualizar que o acréscimo de lodo de esgoto ao lodo de ETA leva a um aumento da eficiência da biodegradação, principalmente para o tratamento ETA 10%, que apresentou valores 2,1 vezes maiores quando na presença de lodo de esgoto. Para os demais tratamentos, esse aumento foi de apenas 1,6 vezes. No entanto, ao invés do lodo de esgoto favorecer um aumento expressivo da biodegradabilidade do lodo de ETA, o que acontece é exatamente o contrário, onde o lodo de ETA inibe a degradação do lodo de esgoto.

**Figura 19** - Eficiência da biodegradação dos tratamentos, na ausência do solo, calculada a partir dos dados respirométricos após 63 dias de ensaio.



Fonte: A autora, 2019.

Embora alguns trabalhos publicados tenham sido realizados para avaliar a biodegradação de lodo de esgoto a partir de ensaios respirométricos visando sua estabilização (Banegas et al., 2007; Bożym; Siemiątkowski, 2018; Tas, 2010), é desconhecida a avaliação, por meio de respirometria, da biodegradabilidade desses dois resíduos associados, visando seu uso agrícola, o que ressalta a importância do presente estudo.

Desse modo, é possível inferir que o material estudado possui potencial de biodegradação, principalmente na proporção de 5% e quando misturado ao lodo de esgoto, apresentando, assim, potencialidade de incorporação em solos. Adicionalmente, essa associação, além de favorecer a eficiência da biodegradação, pode também trazer benefícios do ponto de vista agrônomo, como, por exemplo, o aumento da concentração de macronutrientes e micronutrientes, o que o transformaria em um excelente condicionador de solos.

## 5.5 Teste de fitotoxicidade aguda com sementes

O teste de fitotoxicidade foi feito com os tratamentos antes e após estes serem submetidos à biodegradação. As sementes de *L. sativa* (alface) e de *E. sativa* (rúcula) foram submetidas à germinação em placas contendo os diferentes extratos aquosos dos tratamentos do ensaio de respirometria. Além disso, para este ensaio, também foi feita a exposição das sementes aos solubilizados do lodo de ETA e de ETE puros.

### 5.5.1 Teste de fitotoxicidade aguda com *Lactuca sativa* (alface)

Os resultados obtidos para o ensaio de fitotoxicidade com sementes de alface estão apresentados na tabela 15. Segundo Pascual et al. (1997), as sementes de alface (*L. sativa*) são as mais utilizadas em testes de fitotoxicidade, sendo um bioindicador bastante sensível de componentes tóxicos para as plantas em amostras de resíduos.

**Tabela 15** - Germinação e comprimento (mm) de raízes em *L. sativa* expostas aos diferentes tratamentos, antes e após biodegradação.

| TRATAMENTOS             | ANTES E APÓS O ENSAIO DE RESPIROMETRIA | GERMINAÇÃO  | HIPOCÓTILO     | RADÍCULA      | TAMANHO TOTAL |
|-------------------------|----------------------------------------|-------------|----------------|---------------|---------------|
| Controle Negativo       | -                                      | 9,67 ± 0,47 | 1,35 ± 0,17    | 1,19 ± 0,39   | 2,54 ± 0,52   |
| Controle Positivo       | -                                      | 0           | 0*             | 0*            | 0*            |
| ETE                     | Não Biodegradado                       | 0           | 0*             | 0*            | 0*            |
| ETA                     | Não Biodegradado                       | 9,67 ± 0,47 | 2,17 ± 0,12    | 1,29 ± 0,20   | 3,47 ± 0,19   |
| SOLO                    | Não Biodegradado                       | 9,33 ± 0,94 | 1,71 ± 0,73    | 1,34 ± 0,59   | 3,05 ± 1,31   |
|                         | Biodegradado                           | 8,33 ± 0,47 | 1,94 ± 0,15    | 1,68 ± 0,16   | 3,62 ± 0,30   |
| SOLO + ETE 5%           | Não Biodegradado                       | 8,67 ± 0,47 | 2,15 ± 0,54    | 1,35 ± 0,53   | 3,50 ± 1,06   |
|                         | Biodegradado                           | 9,00 ± 0,82 | 0,42 ± 0,04 +  | 0,46 ± 0,05 + | 0,88 ± 0,09 + |
| SOLO + ETA 5%           | Não Biodegradado                       | 9,00 ± 0,82 | 1,94 ± 0,06    | 1,35 ± 0,07   | 3,29 ± 0,19   |
|                         | Biodegradado                           | 9,33 ± 0,94 | 2,09 ± 0,44    | 1,44 ± 0,46   | 3,53 ± 0,89   |
| SOLO + ETA 10%          | Não Biodegradado                       | 9,00 ± 0,00 | 1,88 ± 0,15    | 1,32 ± 0,19   | 3,20 ± 0,33   |
|                         | Biodegradado                           | 9,00 ± 0,82 | 2,00 ± 0,25    | 1,44 ± 0,16   | 3,43 ± 0,38   |
| SOLO + ETA 15%          | Não Biodegradado                       | 8,67 ± 0,94 | 1,76 ± 0,75    | 1,22 ± 0,59   | 2,97 ± 1,33   |
|                         | Biodegradado                           | 9,67 ± 0,47 | 2,73 ± 0,22* + | 1,61 ± 0,16 + | 4,35 ± 0,34 + |
| SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | Não Biodegradado                       | 9,33 ± 0,47 | 2,11 ± 0,24    | 1,45 ± 0,20   | 3,56 ± 0,18   |
|                         | Biodegradado                           | 9,33 ± 0,47 | 1,96 ± 0,48    | 1,82 ± 0,63   | 3,77 ± 1,11   |
| SOLO + ETE 5% + ETA 10% | Não Biodegradado                       | 9,00 ± 0,82 | 2,00 ± 0,32    | 1,18 ± 0,33   | 3,17 ± 0,59   |
|                         | Biodegradado                           | 8,67 ± 0,47 | 1,82 ± 0,44    | 1,31 ± 0,30   | 3,13 ± 0,73   |
| SOLO + ETE 5% + ETA 15% | Não Biodegradado                       | 8,67 ± 1,89 | 1,45 ± 0,44    | 0,96 ± 0,59   | 2,41 ± 1,00   |
|                         | Biodegradado                           | 8,67 ± 1,25 | 1,94 ± 0,86    | 1,42 ± 0,79   | 3,36 ± 1,65   |

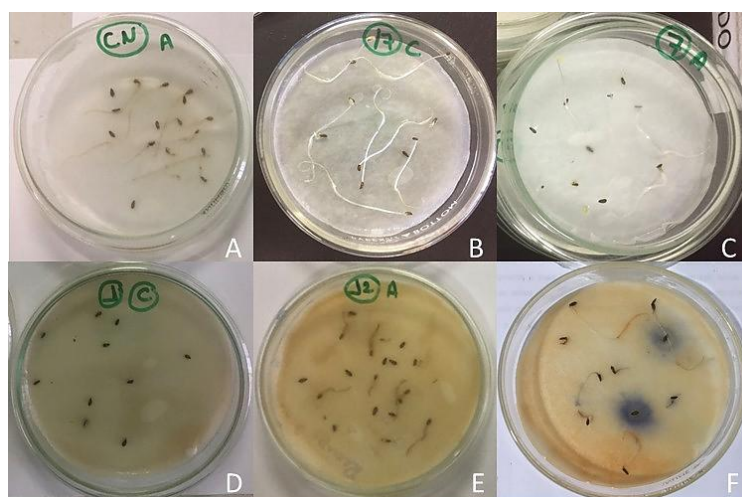
**Nota:** \* Estatisticamente Significativo em relação ao Controle Negativo ( $p < 0,05$ )

+ Estatisticamente Significativo quando comparado ao mesmo tratamento não biodegradado ( $p < 0,05$ )

**Fonte:** A autora, 2019.

Todos os tratamentos apresentaram um índice de germinação superior a 80%, evidenciando a ausência de um efeito tóxico para esse parâmetro. A exceção foi a amostra de lodo de ETE puro, que inibiu completamente a germinação dessa espécie (Figura 20). Outros autores também relataram que o lodo de esgoto, *in natura*, é potencialmente tóxico para sementes de diferentes espécies vegetais, causando a inibição da germinação (FUENTES et. al., 2006; MAZZEO et al., 2015; SOUZA, 2018; WALTER; MARTÍNEZ; CALA, 2006).

**Figura 20** - Crescimento de raízes de *L. sativa* expostas aos diferentes tratamentos. **A.** Exemplo do crescimento no tratamento Controle Negativo. **B.** Exemplo do crescimento no tratamento SOLO + ETE 5% + ETA 10% (após biodegradação). **C.** Exemplo de crescimento no tratamento SOLO + ETA 15% (antes da biodegradação). **D.** Exemplo do crescimento no tratamento ETE. **E.** Exemplo do crescimento no tratamento SOLO + ETE 5% (após biodegradação). **F.** Exemplo do crescimento no tratamento SOLO (antes da biodegradação)

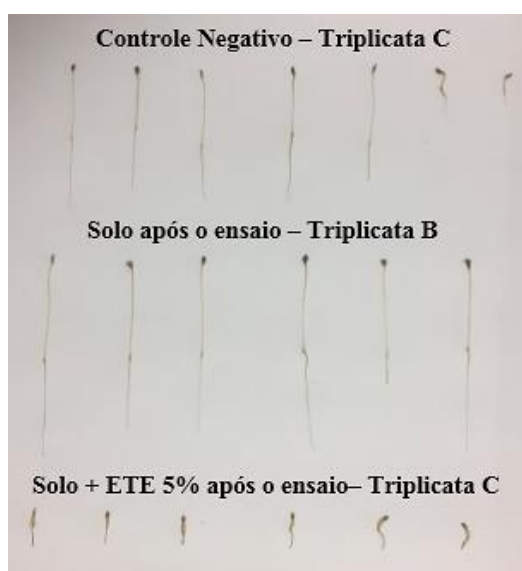


**Fonte:** A autora, 2019.

Em relação ao ensaio de alongamento da raiz, com exceção do controle positivo e do lodo de ETE *in natura* (pois nestes nenhuma semente germinou), nenhum dos tratamentos apresentou efeito estatisticamente significativo quando comparado ao controle negativo. Apenas o tratamento SOLO + ETA 15% conduziu a um aumento estatisticamente maior do hipocótilo quando comparado com o controle negativo, no período após a biodegradação. Para este mesmo tratamento, também foram observados resultados significativos para o aumento do comprimento do hipocótilo, da radícula e do tamanho total da raiz, quando comparado os períodos antes e após biodegradação. Assim, como a concentração de nutrientes contribui diretamente para o crescimento da raiz (Solaiman et al., 2012), parece que para o

tratamento SOLO + ETA 15%, o período de biodegradação contribuiu para a liberação de compostos nutritivos para a planta. Contrariamente, o período de biodegradação para o tratamento controle SOLO + ETE 5% ocasionou uma inibição do crescimento do hipocótilo, da radícula e do tamanho total da raiz quando comparado com o resultado obtido antes da biodegradação (Figura 21). Possivelmente, ocorreu a liberação de compostos inibidores durante o ensaio de respirometria, o que acarretou em uma diminuição do tamanho dessas raízes.

**Figura 21** - Comparação do crescimento das sementes de alface dos tratamentos Controle Negativo, Solo (após biodegradação) e Solo + ETE 5% (após biodegradação), respectivamente



**Fonte:** A autora, 2019.

Portanto, para esse organismo-teste, os tratamentos testados responderam de forma bastante satisfatória, uma vez que não apresentaram efeito fitotóxico e ainda proporcionaram aumento do tamanho da raiz. O processo de biodegradação também parece ser indicado para promover a estabilização desses resíduos, pois os maiores valores foram observados para os tratamentos após a biodegradação. Embora a presença de lodo de esgoto nas amostras favoreça o aumento da respiração microbiana, promovendo taxas mais elevadas de produção de CO<sub>2</sub>, o lodo de ETA parece fornecer um melhor meio para crescimento das raízes de alface, uma vez que o lodo de ETA *in natura* não foi fitotóxico para essa espécie.

### 5.5.2 Teste de fitotoxicidade aguda com *Eruca sativa* (rúcula)

A tabela 16 traz os resultados obtidos para o ensaio realizado com sementes de rúcula. Segundo a OECD (2003), a espécie *E. sativa* encontra-se entre os vegetais mais recomendados para ensaios de fitotoxicidade de amostras ambientais.

**Tabela 16** - Germinação e comprimento (mm) de raízes em *E. sativa* expostas aos diferentes tratamentos, antes e após biodegradação.

| TRATAMENTOS             | ANTES E APÓS O ENSAIO DE RESPIROMETRIA | GERMINAÇÃO  | HIPOCÓTILO    | RADÍCULA      | TAMANHO TOTAL |
|-------------------------|----------------------------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Controle Negativo       | -                                      | 9,67 ± 0,47 | 2 ± 0,20      | 2,79 ± 0,63   | 4,79 ± 0,81   |
| Controle Positivo       | -                                      | 0           | 0*            | 0*            | 0*            |
| ETE                     | Não Biodegradado                       | 0           | 0*            | 0*            | 0*            |
| ETA                     | Não Biodegradado                       | 9,33 ± 0,47 | 2,74 ± 0,16   | 2,89 ± 0,33   | 5,62 ± 0,38   |
| SOLO                    | Não Biodegradado                       | 9,00 ± 0,82 | 2,68 ± 0,33   | 3,52 ± 0,80   | 6,20 ± 0,73   |
|                         | Biodegradado                           | 9,00 ± 1,41 | 1,85 ± 0,29 + | 3,74 ± 1,44   | 5,59 ± 1,66   |
| SOLO + ETE 5%           | Não Biodegradado                       | 9,00 ± 0,82 | 2,57 ± 0,30   | 3,41 ± 0,31   | 5,98 ± 0,01   |
|                         | Biodegradado                           | 8,67 ± 1,25 | 0,79 ± 0,11 + | 1,23 ± 0,55 + | 2,02 ± 0,65 + |
| SOLO + ETA 5%           | Não Biodegradado                       | 9,33 ± 0,94 | 2,26 ± 0,16   | 3,5 ± 0,66    | 5,76 ± 0,82   |
|                         | Biodegradado                           | 9,00 ± 0,82 | 1,49 ± 0,46 + | 2,58 ± 0,46 + | 4,08 ± 0,87 + |
| SOLO + ETA 10%          | Não Biodegradado                       | 8,33 ± 1,70 | 2,24 ± 0,58   | 3,37 ± 0,72   | 5,61 ± 1,29   |
|                         | Biodegradado                           | 8,67 ± 1,25 | 2,41 ± 0,84   | 3,25 ± 0,84   | 5,66 ± 1,26   |
| SOLO + ETA 15%          | Não Biodegradado                       | 8,33 ± 1,25 | 2,05 ± 0,52   | 2,54 ± 1,15   | 4,59 ± 1,66   |
|                         | Biodegradado                           | 9,33 ± 0,94 | 3,21 ± 0,19*+ | 3,30 ± 0,55   | 6,51 ± 0,46 + |
| SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | Não Biodegradado                       | 9,67 ± 0,47 | 2,65 ± 0,12   | 2,45 ± 0,40   | 5,10 ± 0,39   |
|                         | Biodegradado                           | 8,67 ± 1,25 | 3,12 ± 0,46*+ | 3,59 ± 0,92 + | 6,71 ± 1,36 + |
| SOLO + ETE 5% + ETA 10% | Não Biodegradado                       | 7,33 ± 1,25 | 1,96 ± 0,55   | 2,05 ± 0,73   | 4,01 ± 1,27   |
|                         | Biodegradado                           | 9,00 ± 0,82 | 2,76 ± 0,25 + | 3,08 ± 0,09 + | 5,83 ± 0,31 + |
| SOLO + ETE 5% + ETA 15% | Não Biodegradado                       | 9,33 ± 0,47 | 2,8 ± 0,61    | 2,99 ± 0,43   | 5,80 ± 1,00   |
|                         | Biodegradado                           | 8,00 ± 0,82 | 3,12 ± 0,46*  | 3,53 ± 0,68   | 6,65 ± 1,10   |

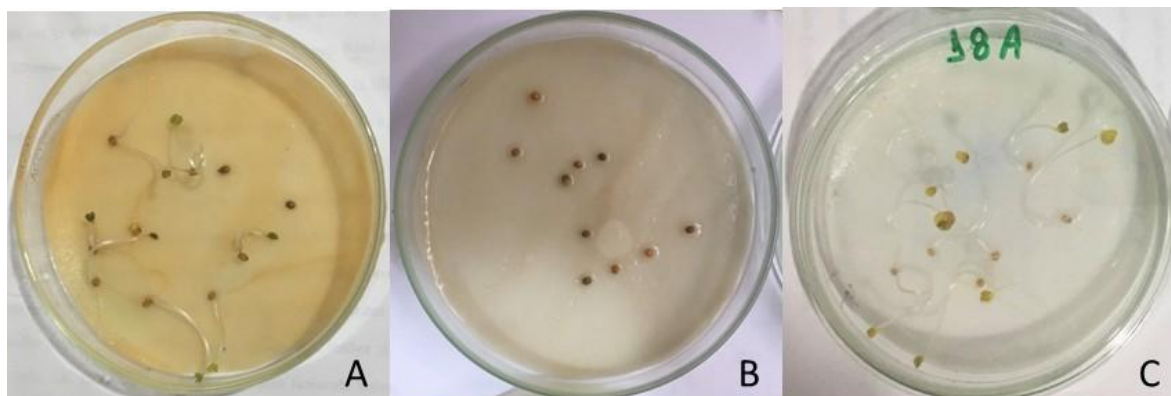
Nota: \* Estatisticamente Significativo em relação ao Controle Negativo (p<0,05)

+ Estatisticamente Significativo quando comparado ao mesmo tratamento não biodegradado (p<0,05)

Fonte: A autora, 2019.

A germinação para esta espécie atingiu índices superiores a 70% para todos os tratamentos. Assim como ocorreu no ensaio com *L. sativa*, a exceção foi o lodo de ETE *in natura*, que também inibiu completamente a germinação das sementes de *E. sativa* (Figura 22).

**Figura 22** - Sementes de rúcula expostas aos diferentes tratamentos. **A.** Exemplo do crescimento no tratamento SOLO (após biodegradação). **B.** Exemplo do crescimento no tratamento ETE. **C.** Exemplo de crescimento no tratamento SOLO + ETE 5% + ETA 15% (após biodegradação)



**Fonte:** A autora, 2019.

Quanto ao crescimento das raízes, nenhum tratamento foi considerado fitotóxico para essa espécie, indicando a possibilidade de uso como condicionante de solos agrícolas. Embora, para maior segurança, a realização de ensaios com organismos representantes de outros níveis tróficos e de testes empregando outros parâmetros seja altamente recomendada.

Corroborando os resultados obtidos para a alface, resultados estatisticamente significativos foram observados para a amostra SOLO + ETA 15%, após período de biodegradação, a qual promoveu um aumento do hipocótilo quando comparado ao controle negativo. No entanto, para a rúcula, esse mesmo aumento significativo do hipocótilo também foi observado para as amostras SOLO + ETE 5% + ETA 5% e SOLO + ETE 5% + ETA 15%, após biodegradação. Ao se comparar um mesmo tratamento antes e após a biodegradação, foram encontrados resultados significativamente maiores para SOLO + ETA 15%, SOLO + ETE 5% + ETA 5% e SOLO + ETE 5% + ETA 10% para pelo menos duas regiões da raiz avaliadas. Possivelmente, estes resultados são decorrentes da presença de nutrientes no lodo de ETA (MESSIAS, 2013; ODIMEGWU et al., 2018; TEIXEIRA et al. 2005) e no lodo de ETE (MAHDY et al., 2009; MELO; MARQUES, 2000) que estimulam o crescimento da planta. Portanto, assim como o ensaio com alface, mais uma vez, o teste de fitotoxicidade com rúcula, também comprovou que o uso do lodo de ETA como fertilizante de solos pode ser uma alternativa favorável para a destinação final desse resíduo. Em especial para a rúcula, a associação lodo de ETA e lodo de ETE também promoveu resultados satisfatórios do ponto de vista agrônomo.

Para o ensaio com rúcula, além do tratamento controle SOLO + ETE 5%, o tratamento SOLO + ETA 5% também induziu à uma diminuição significativa do comprimento do hipocótilo, radícula e tamanho total da plântula após o período de biodegradação. Tal fato pode ser justificado por um consumo dos nutrientes presentes no tempo inicial pelos micro-organismos durante o experimento de respirometria, uma vez que esta amostra apresentou a maior eficiência de biodegradação para o lodo de ETA, diminuindo a quantidade disponível para a rúcula.

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com as análises realizadas no presente trabalho, pode-se concluir que:

- A incorporação de lodo de esgoto aos tratamentos contendo lodo de ETA e solo contribuiu para aumento da respiração microbiana e da eficiência da biodegradação. No entanto, a biodegradação do lodo de ETA em solo foi mais eficaz quando há menores concentrações de lodo de ETA;
- Em decorrência de sua própria origem, o lodo de ETA possui maior quantidade de compostos recalcitrantes quando comparado com o lodo de esgoto;
- Nenhum dos tratamentos testados induziu alterações no padrão de germinação e crescimento de raiz das espécies *L. sativa* e *E. sativa*, indicando que o lodo de ETA não é um resíduo com potencial fitotóxico para essas plantas;
- A associação de lodo de ETA com lodo de ETE pode trazer vantagens para seu uso na agricultura, dependendo das espécies cultivadas, uma vez que contribuíram para um crescimento significativamente maior para o hipocótilo de *E. sativa*;
- Baseado nos resultados aqui obtidos em relação à sua biodegradabilidade em solo e ausência de fitotoxicidade, o lodo de ETA apresenta potencial para uso como condicionante de solo na agricultura, o que caracteriza em um destino mais ambientalmente sustentável.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.614: Águas – Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) – Método de incubação (20 °C, 5 dias)**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA – Lei 12.305/2010**. In: 45<sup>a</sup> Assembleia Nacional do ASSEMAE – Saneamento Ambiental: políticas integradas com participação social, Poços de Caldas – MG, 2015.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. **Sustainable management of water treatment sludge through 3 ‘R’ concept**. Journal of Cleaner Production, 2016a. v. 124, p. 1–13.

ANDREOLI, C.V.; FERREIRA, A.C.; CHERUBINI, C.; TELES, C.R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. **Higienização do lodo de esgoto**. In: Cleverson Vítório Andreoli (coord.). Resíduos Sólidos do Saneamento: Processo, reciclagem e disposição final. PROSAB, 2001. v. 2, cap.4, p.87-116.

ASSIS, L. R. de. **Avaliação do impacto em corpos d’água devido ao lançamento de resíduos de uma estação de tratamento de água de Juiz de Fora – MG**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) - Faculdade de Engenharia da UFJF, Juiz de Fora, 2014.

AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. New York: McGraw Hill, 1999.

BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 2007. v. 37, n. 2, p. 129–164.

Banegas, V.; Moreno, J. L.; Moreno, J. I.; García, C.; León, G.; Hernández, T. **Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust**. Waste Management, v.27, n.10, p.1317-1327, 2007.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Estudo de caso - ETA São Carlos (São Paulo/Brasil) produção de sólidos em ETAs**. Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental 2002. p.1-9.

BARTHA, R. & PRAMER, D. **Features of a flask and method for measuring the persistence and biological effects of pesticides in soil.** Soil Science, 100, 1965. p.68-70.

BEECHER, N. **Overview: moving forward the sustainable and welcome uses a global resource.** In: LeBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. (Eds.). Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses a global resource. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT), 2008.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. **Uso de lodo de esgoto na agricultura.** In: COSCINE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. (Org.). Uso agrícola de lodo de esgoto: Avaliação após a Resolução nº 375 do CONAMA. Botucatu: editora FEPAF, 2010. 407 p., 1ª edição, cap. 2, p 31-50.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola.** In: **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349p.

BETTIOL, W; CAMARGO, O.A. **Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura.**Jaguariúna, Embrama Meio Ambiente, 2006. 343p.

Bożym, M., & Siemiątkowski, G. **Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study.** Environmental Science and Pollution Research, 2018.

BRASIL. **Lei Nº 9433 de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos, 1997.

BRASIL. **Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998.** Lei dos Crimes Ambientais, 1998.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010.** Política Nacional de Resíduos Sólidos. Congresso Nacional, Brasília, DF, 2010.

BRASIL, Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017.** Dispõe Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde, Ministério da Saúde, 2017.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 375 de 29 de agosto de 2006.** Define critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providencias. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006, p.32.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 237 de 19 de dezembro de 1997.** Procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental como instrumento de gestão ambiental. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 1997.

CARMO, D. L. do; SILVA, C. A. **Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, 2012. v. 36, n. 4, p. 1211-1220.

CESAR, R.G.; ÁLVARO, T.T.; SILVA, M.B.; COLONESE, J.; PEREIRA, C.; POLIVANOV, H.; EGLER, S.G.; BIDONE, E.D.; CASTILHOS, Z.C. **Biodisponibilidade de contaminantes em solos brasileiros tratados com lodo de esgoto: uma abordagem ecotoxicológica utilizando bioensaios com organismos aquáticos e edáficos**. Geochimica Brasiliensis, in press, 2011. p. 41-49.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Demanda química de oxigênio (DQO) – Método da oxidação por dicromato de potássio em refluxo - Método de ensaio. Norma Técnica L5.121**. São Paulo, 1990.

CHANDRA, R., KUMAR, V.,. **Detection of androgenic-mutagenic compounds and potential autochthonous bacterial communities during in situ bioremediation of post-methanated distillery sludge**. Front. Microbiol, 2017. v.8, p.887.

CHEN, Y. C.; KUO, J. **Potential of greenhouse gas emissions from sewage sludge management: a case study of Taiwan**. Journal of Cleaner Production, 2016. v.129, p.196-201.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. 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. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 21 jul, 2019.

CORNWELL, D.A.; BISHOP, M.M.; GOULD, R.R.; VANDERMEYDEN, C. **Handbook on water treatment plant wastes management**. Denver, AWWA Research Foundation, 1987.

CORNWELL, D.A. **Water treatment residuals engineering**. Denver: AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 2006.

CZERNIAWSKA-KUSZA I, CIESIELCZUK T, KUSZA G, CICHÓN A. **Comparison of the Phytotoxkit microbiotest and chemical variables for toxicity evaluation of sediments**. Environ Toxicol. 2006. p. 367-372.

DA MATTA, M. E. M. **Índice de perigo para subsidiar a aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola**. 2011. 100p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: RiMa Editora, v. 2. 1584 p, 2005.

DE MELO, W. J.; De MELO, G. M; De MELO, V. P.; BERTIPAGLIA, L. M. A. **A Resolução CONAMA nº 375 e os metais pesados**. In: COSCINE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto**:

Avaliação após a Resolução nº375 do CONAMA. Botucatu: editora FEPAF, 2010. cap. 6, p 113-133.

DEZOTTI, Márcia. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**: Volume 5 da Série Escola Piloto de Engenharia Química. Editora E-papers, 2008, 359 p.

FARIA, R. L. de. **O uso do lodo de esgoto na agricultura: impactos ambientais e restrições técnicas**. Revista Complexus, Salto, n.3, mai. 2011.

FEITOSA, M.C. **Lodos de Esgoto: Algumas aplicações em engenharia**. Dissertação de mestrado, UNICAP, Recife, PE, 2009. p.120.

FEITOSA, C. A.; CONSONI, A. J. **Análise de oportunidades de minimização da geração de lodo na Estação de Tratamento de Água Alto da Boa, SÃO PAULO**. Interfacehs – revista de gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente – v.3, n 2, Seção Interfacehs 2, abr./ago. 2008.

FIÚZA, A. M. A.; VILA, M. C. C. **An insight into soil bioremediation through respirometry**. Environment International, 2004. v. 31, n. 2, p. 179-183.

FONTANA, A.O. **Sistema de Leito de Drenagem e Sedimentador Como Solução Para Redução de Volume de Lodo de Decantadores e Reuso de Água de Lavagem de Filtros - Estudo de Caso – ETA Cardoso**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos/UFSCAR. São Carlos. 2004.

FRANCO, E. F. **Avaliação da Influência dos Coagulantes de Alumínio e Cloreto Férrico na Remoção de Turbidez e Cor da Água Brita e Sua Relação com Sólidos na Geração de Lodo em Estações de Tratamento de Água**. 2009. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - SP. 2013.

FUENTES, A.; LLORENS, M.; SAEZ, J.; AGUILAR, M.I.; PÉREZ-MARÍN, A.B.; ORTUÑO, J.F.; MESEGUER, V.F. 2006. **Ecotoxicity, phytotoxicity and extractability of heavy metals from different stabilised sewage sludges**. Environmental pollution, 2006. v. 143, n. 2, p.355-360.

GASTALDINI, A. L. G. et al. **The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition**. Construction and building materials, 2015. v. 94, p. 513–520.

GOLDIN, A. **Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 18, 1987. p.1111-1116.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR., A. D. **Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal. Anais[...], Natal: ABES, 1993. v.2, p. 324-341.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C.V. **Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de**

**concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental.** Quim. Nova, 2006. v. 29, n. 1, p. 79-84.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2010. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>. Acesso em: 15 set, 2019.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da Produção de Lodo de Estações de Tratamento de Água de Ciclo Completo: Uma Análise Crítica.** Universidade de São Paulo, 2012.

KYNCL, M., CIHALOVA, S., JUROKOWA, M., & LANGAROVA, S. **Disposal and Reuse of Water Processing Sludge.** Journal of the Polish Mineral Engineering Society 2(13), 2012. v.2, p.11-20.

LUCENA, L.C. **Estudo da aplicação da tratamento solo-lodo em base e sub-base de pavimentos.** Tese de doutorado, UFPE, Recife, PE, 2012. p.263.

MAHDY, A. M. et al. **Effects of co-application of biosolids and water treatment residuals on corn growth and bioavailable phosphorus and aluminum in alkaline soils in Egypt.** Journal of environmental quality, 2009. v. 38, n. 4, p. 1501–1510.

MAZZEO, D.E.C., Fernandes, T.C.C., LEVY, C.E., FONTANETTI, C.S., MARIN-MORALES, M.A., **Monitoring the natural attenuation of a sewage sludge toxicity using the Allium cepa test.** Ecol. Indic., 2015. v.56, p.60–69.

MCLACHLAN, D.R.C. **Aluminium and the risk for Alzheimer's disease.** Environmetrics, 1995; v.6, p.233-275.

MELLO, E. J. R. **Tratamento de esgoto sanitário, Avaliação da estação de tratamento de esgoto do Bairro Novo Horizonte na cidade de Araguari.** Monografia, UNIMINAS, Uberlândia, MG, 2007. p.77.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** 4 ed. Revisado por George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. New York: McGraw-Hill, 2003.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O. **Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas.** In: Bettiol, W & Camargo, O.A. eds, Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto, Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.45-67.

MESSIAS, T. G. **Avaliação ecotoxicológica de lodo gerado por estação de tratamento de água.** [s.l.] Tese de doutorado: Universidade de São Paulo, 2013.

MONTAGNOLLI, R.N.; LOPES, P.R.M.; BIDOIA, E.D. **Applied models to biodegradation kinetics of lubricant and vegetable oils in wastewater.** International Biodeterioration e Biodegradation, v. 63, p. 297-305, 2009.

NUVOLARI, Ariovaldo. **Aplicação de lodo de esgotos municipais no solo: ensaios de respirometria para avaliar a estabilidade do lodo**. 1996. 158f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258383>. Acesso em: 01 jul. 2019.

ODIMEGWU, T. C. et al. **Review on Different Beneficial Ways of Applying Alum Sludge in a Sustainable Disposal Manner**, 2018. v. 4, n. 9, p. 2230–2241.

OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). **Guidelines for Testing of Chemicals, Guideline 307, Aerobic and Anaerobic Transformation in Soil** (2002). Disponível em: <http://www.oecd.org/>. Acesso em: 03 set, 2019.

OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). **Guideline for the testing of chemicals** (2003) Terrestrial plant test: 208: Seedling emergence and seedling growth test. Disponível em: <http://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/33653757.pdf>. Acesso em: 27 set, 2019.

OLINGER, C.; CARDOSO, M.; LAPOLLI, F. R. **Caracterização e clarificação da água de lavagem do filtro de uma ETA que utiliza como coagulante o sulfato de alumínio**. In: 21o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21o, 2001, João Pessoa: Anais[...]. 2001.

OLIVEIRA, I. Y. Q.; RONDON, O. C. **Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. Interações (Campo Grande)**, Campo Grande, 2016. v.17, n.4, p.687-698.

ORZI, V.; SCAGLIA, B.; LONATI, S.; RIVA, C.; BOCCASILE, G.; ALBORALI, G.L. e ADANI, F., Science of the Total Environment. 2015, v.526, p.116–126.

PADILHA, J. C. **Aplicação de lodos de tratamentos de água e esgoto em latossolos cultivados com milho e soja**. Dissertação (Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007. 346f.

PASCUAL, J.A.; AYUSO, M.; GARCIA, C.; HERNÁNDEZ, T. **Characterization of urban wastes according to fertility and phytotoxicity parameters**. Waste Manage, 1997. res. 15, p. 103– 112.

PENN, M. R., PAUER, J. J., & MIHELIC, J. R. **Biochemical oxygen demand**. Environmental and ecological chemistry, 2009. V.2, p.278-297.

PEREIRA, S. L. M. **Características físicas, químicas e microbiológicas do lodo das lagoas da ETA Gramame**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

REALI, M. A. P. (coord). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. 1ª ed.. Rio de Janeiro: ABES, 1999, 240 p. Projeto PROSAB.

REALI, N. S. **Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs.** (Capítulo II). Coordenador: Realí, M. A. P. Noções gerais de tratamento e disposição de lodos de estações de tratamento de água. Rio Janeiro: ABES, 1999.

REIS, E. L. T.; COTRIM, M.; RODRIGUES, C.; PIRES, M. A. F.; BELTRAME FILHO, O.; CUTOLO, S. A.; ROCHA, S. M. **Identificação da Influência do Descarte de Lodo de Estações de Tratamento de Água.** Química Nova, v. 30, p. 865/11678-7064-872, 2007.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** Ed. Edgard Blucher Ltda., S. Paulo (2001).

ROIG, N.; SIERRA, J.; MARTÍC, E.; NADAL, M.; SCHUHMACHER, M.; DOMINGO, J. L. **Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning.** Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 158. p. 41-48, 2012.

SCAGLIA, B., D'Imporzano, G., Garuti, G., Negri, M., Adani, F.,. **Sanitation ability of anaerobic digestion performed at different temperature on sewage sludge.** Science of the Total Environment, 2014. p.466–467, p.888–897.

SCALIZE, P.S. (1997). **Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário.** 1997. 220 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SCALIZE, P. S. **Disposição de resíduos gerados em uma estação de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto.** 2003. 146 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SCHOWANEK, D; CARR, R.; DAVID, H.; DOUBEN, P.; HALL, J.; KIRCHMANN, H.; PATRIA, L.; SEQUI, P.; SMITH, S.; WEBB, S. **A risk-based methodology for deriving quality standards for organic contaminants in sewage sludge for use in agriculture: conceptual framework.** Regulatory Toxicology and Pharmacology, v. 40, 2004. p.227-251.

SILVA JR., A. P. da; ISAAC, R. de L. **Adensamento por Gravidade de Lodo de ETA Gerado em Decantador Convencional e Decantador Laminar.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancún – México. Anais[...] Cancún: AIDIS, 2002. 1 CD-ROM.

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012. 136 p.

SMITH, S.R., LANG, N.L., CHEUNG, K.H.M., SPANOUDAKI, K.,. **Factors controlling pathogen destruction during anaerobic digestion of biowastes.** Waste Manag, 2005. v.25, p.417–425.

SOARES, M. R. **Coeficiente de distribuição (kd) de metais pesados em solos do estado de São Paulo**. 2004. 202 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SOBRERO, M. S.; RONCO, A. **Ensayo de Toxicidad aguda com semillas de lechuga**. In: G.C. MORALES (ed.), *Ensayos Toxicológicos y Métodos de Evaluación de Calidad de Águas: Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones*. Ottawa, IDRC, 2004. p. 71-79.

SOLAIMAN, Z.M., MURPHY, D. V., ABBOTT, L.K., 2012. **Biochars influence seed germination and early growth of seedlings**. *Plant Soil*, 2012. v.353, p.273–287.

SOMMAGGIO, L.R.D., MAZZEO, D.E.C., SANT' ANNA, D. de A. e. S., LEVY, C.E., MARIN- MORALES, M.A.,. **Ecotoxicological and microbiological assessment of sewage sludge associated with sugarcane bagasse**. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2018. v.147, p.550–557. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.009>. Acesso em: 10 set, 2019.

SOTERO-SANTOS, R. B.; ROCHA, O.; POVINELLI, J. **Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphnia bioassay**. *Water Research*, 2005. v. 39, n. 16, p. 3909–3917.

SOUZA, M. N. **Efetividade da biorremediação de lodo de esgoto aeróbio bioestimulado, avaliada pelo ensaio de *Allium cepa***. 2018. 47 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2018.

TAKAHIDE, S. **Handbook of Water Treatment second English edition**. Kurita, Tokyo, Japão, 1999. v. 2., p. 501.

TAS, D.O. **Respirometric assessment of aerobic sludge stabilization**. *Bioresour Technol*, 2010. v. 101, p. 2592–2599.

TEIXEIRA, S. T.; MELO, W. J.; SILVA, E. T. **Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, 2005. v.40, n.1, p.91-94.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. *Anais[...]*, João Pessoa: ABES, 2001.

USEPA. **United States Environmental Protection Agency**. Federal Water Pollution Control Act - Section 405, 1972.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. **The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soil**. *Soil Science*, 1931. v.32, p.181-193.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte, UFMG, 1996. v.2.

WALTER, I.; MARTÍNEZ, F.; CALA, V. **Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses.** Environmental Pollution, 2006. v.139, p.507-514.

ZANATTA, Maraline Conservani Klingohr. **Caracterização da toxicidade de lodos de estação de tratamento de esgoto com vistas a sua aplicação agrícola**, 2014. 79 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267708>. Acesso em: 01 jul. 2019.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – MÉDIA DAS MEDIÇÕES DIÁRIAS DO ENSAIO DE  
RESPIROMETRIA**

| DIAS | TRATAMENTOS  |               |               |                |                |                        |                         |                         |              |
|------|--------------|---------------|---------------|----------------|----------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|      | SOLO         | SOLO + ETE 5% | SOLO + ETA 5% | SOLO + ETA 10% | SOLO + ETA 15% | SOLO + ETE 5% + ETA 5% | SOLO + ETE 5% + ETA 10% | SOLO + ETE 5% + ETA 15% | BRANCO       |
| 1    | 18,74 ± 0,08 | 8,24 ± 0,06   | 15,65 ± 0,30  | 16,26 ± 0,11   | 15,68 ± 0,20   | 8,41 ± 0,07            | 9,56 ± 0,34             | 9,77 ± 0,08             | 18,03 ± 0,06 |
| 2    | 17,53 ± 0,15 | 8,26 ± 0,19   | 16,25 ± 0,11  | 16,19 ± 0,16   | 15,81 ± 0,10   | 9,18 ± 0,09            | 10,98 ± 0,29            | 11,11 ± 0,07            | 18,03 ± 1,89 |
| 3    | 16,85 ± 0,04 | 9,53 ± 0,09   | 15,83 ± 0,05  | 16,00 ± 0,17   | 15,57 ± 0,08   | 10,63 ± 0,19           | 11,30 ± 0,19            | 11,66 ± 0,15            | 18,03 ± 2,18 |
| 4    | 16,85 ± 0,04 | 10,31 ± 0,33  | 15,88 ± 0,16  | 15,90 ± 0,11   | 15,74 ± 0,14   | 11,40 ± 0,08           | 12,15 ± 0,24            | 12,36 ± 0,03            | 18,03 ± 2,10 |
| 5    | 16,90 ± 0,13 | 10,09 ± 0,35  | 16,21 ± 0,17  | 16,07 ± 0,14   | 15,74 ± 0,13   | 12,27 ± 0,07           | 12,69 ± 0,12            | 12,95 ± 0,08            | 18,03 ± 0,02 |
| 6    | 16,61 ± 0,14 | 10,50 ± 0,16  | 16,42 ± 0,16  | 16,14 ± 0,19   | 15,95 ± 0,09   | 12,14 ± 0,07           | 12,90 ± 0,22            | 13,41 ± 0,16            | 18,03 ± 1,90 |
| 7    | 17,02 ± 0,05 | 11,10 ± 0,16  | 16,41 ± 0,09  | 16,33 ± 0,05   | 16,09 ± 0,18   | 12,83 ± 0,07           | 12,97 ± 0,10            | 13,41 ± 0,17            | 18,03 ± 0,39 |
| 8    | 17,24 ± 0,41 | 11,87 ± 0,07  | 16,49 ± 0,17  | 16,27 ± 0,04   | 15,49 ± 0,97   | 12,75 ± 0,10           | 13,13 ± 0,24            | 13,45 ± 0,10            | 17,79 ± 0,02 |
| 9    | 17,07 ± 0,03 | 12,31 ± 0,09  | 16,50 ± 0,03  | 16,51 ± 0,08   | 16,44 ± 0,02   | 13,03 ± 0,09           | 13,50 ± 0,08            | 13,50 ± 0,06            | 17,81 ± 0,22 |
| 10   | 17,29 ± 0,33 | 12,98 ± 0,03  | 16,71 ± 0,10  | 16,52 ± 0,08   | 16,41 ± 0,02   | 13,12 ± 0,16           | 13,79 ± 0,16            | 13,15 ± 0,66            | 18,19 ± 0,01 |
| 11   | 17,14 ± 0,08 | 13,24 ± 0,29  | 16,80 ± 0,05  | 16,65 ± 0,07   | 16,42 ± 0,07   | 13,30 ± 0,26           | 13,76 ± 0,16            | 12,95 ± 0,96            | 18,35 ± 0,09 |
| 12   | 16,88 ± 0,05 | 13,45 ± 0,29  | 16,81 ± 0,09  | 16,72 ± 0,02   | 16,55 ± 0,08   | 13,61 ± 0,21           | 13,96 ± 0,20            | 13,24 ± 0,65            | 18,21 ± 0,01 |
| 13   | 18,04 ± 0,05 | 13,50 ± 0,11  | 17,09 ± 0,04  | 17,53 ± 0,33   | 16,80 ± 0,16   | 13,86 ± 0,50           | 14,34 ± 0,13            | 13,02 ± 0,62            | 18,46 ± 0,03 |
| 14   | 18,11 ± 0,04 | 14,19 ± 0,39  | 17,93 ± 0,18  | 17,58 ± 0,37   | 17,22 ± 0,37   | 13,68 ± 0,94           | 14,55 ± 0,18            | 13,47 ± 1,01            | 18,26 ± 0,03 |
| 15   | 18,19 ± 0,08 | 14,38 ± 0,05  | 17,94 ± 0,10  | 17,89 ± 0,06   | 17,24 ± 0,35   | 13,99 ± 0,83           | 14,47 ± 0,27            | 13,46 ± 0,68            | 18,36 ± 0,04 |
| 16   | 18,14 ± 0,02 | 14,44 ± 0,05  | 17,89 ± 0,05  | 17,89 ± 0,04   | 17,52 ± 0,48   | 14,38 ± 0,43           | 13,99 ± 0,81            | 13,65 ± 0,54            | 17,95 ± 0,53 |
| 17   | 18,02 ± 0,25 | 14,71 ± 0,12  | 18,04 ± 0,20  | 18,04 ± 0,14   | 17,57 ± 0,46   | 14,73 ± 0,18           | 13,70 ± 1,46            | 14,22 ± 0,75            | 18,62 ± 0,24 |
| 18   | 17,93 ± 0,16 | 14,64 ± 0,17  | 17,52 ± 0,46  | 17,15 ± 0,41   | 17,24 ± 0,40   | 14,73 ± 0,17           | 14,02 ± 1,12            | 14,51 ± 0,73            | 18,80 ± 0,01 |
| 19   | 18,08 ± 0,20 | 15,11 ± 0,15  | 18,00 ± 0,06  | 17,63 ± 0,37   | 17,38 ± 1,06   | 15,16 ± 0,11           | 15,25 ± 0,70            | 15,11 ± 0,71            | 18,50 ± 0,02 |
| 20   | 18,22 ± 0,11 | 15,30 ± 0,27  | 18,22 ± 0,09  | 17,96 ± 0,17   | 16,78 ± 1,05   | 15,50 ± 0,28           | 15,20 ± 0,27            | 15,45 ± 0,40            | 18,47 ± 0,10 |
| 22   | 17,67 ± 0,47 | 13,33 ± 0,40  | 17,07 ± 0,03  | 16,90 ± 0,09   | 16,46 ± 0,09   | 13,16 ± 0,53           | 12,85 ± 0,13            | 13,62 ± 0,85            | 18,84 ± 0,01 |
| 24   | 17,79 ± 0,55 | 13,98 ± 0,29  | 17,53 ± 0,38  | 17,15 ± 0,42   | 16,61 ± 0,04   | 13,49 ± 0,46           | 13,14 ± 0,35            | 14,05 ± 0,41            | 18,40 ± 0,02 |
| 27   | 17,19 ± 0,47 | 12,47 ± 0,31  | 16,54 ± 0,09  | 16,27 ± 0,16   | 15,89 ± 0,20   | 11,83 ± 0,62           | 11,04 ± 1,28            | 12,82 ± 0,45            | 18,72 ± 0,09 |
| 30   | 16,92 ± 0,18 | 12,93 ± 0,12  | 16,76 ± 0,01  | 16,45 ± 0,15   | 16,11 ± 0,16   | 11,91 ± 0,80           | 11,20 ± 1,72            | 13,59 ± 0,53            | 18,75 ± 0,01 |
| 33   | 18,05 ± 0,09 | 13,31 ± 0,13  | 16,59 ± 0,03  | 16,41 ± 0,10   | 16,11 ± 0,02   | 11,64 ± 0,75           | 12,03 ± 1,14            | 13,63 ± 0,79            | 18,79 ± 0,01 |
| 37   | 17,90 ± 0,07 | 11,75 ± 0,35  | 16,33 ± 0,04  | 16,02 ± 0,14   | 15,72 ± 0,02   | 10,73 ± 0,80           | 11,95 ± 0,50            | 12,45 ± 0,76            | 18,84 ± 0,01 |
| 42   | 17,00 ± 0,06 | 10,65 ± 0,95  | 16,06 ± 0,23  | 15,70 ± 0,15   | 15,42 ± 0,16   | 10,72 ± 1,50           | 12,25 ± 0,27            | 11,77 ± 0,77            | 18,62 ± 0,04 |
| 47   | 16,97 ± 0,12 | 11,03 ± 0,98  | 16,43 ± 0,18  | 15,78 ± 0,24   | 15,45 ± 0,05   | 11,59 ± 0,79           | 12,93 ± 0,52            | 11,81 ± 0,75            | 18,60 ± 0,03 |
| 54   | 16,23 ± 0,32 | 9,12 ± 0,88   | 15,59 ± 0,15  | 14,90 ± 0,15   | 14,56 ± 0,11   | 9,40 ± 0,39            | 10,55 ± 0,40            | 9,98 ± 0,87             | 19,60 ± 0,07 |
| 63   | 16,12 ± 0,16 | 7,91 ± 0,18   | 15,49 ± 0,47  | 14,66 ± 0,07   | 14,27 ± 0,14   | 8,56 ± 0,56            | 9,92 ± 0,59             | 9,58 ± 0,70             | 20,60 ± 0,02 |

**APÊNDICE B – MEDIÇÕES DAS SEMENTES GERMINADAS DE ALFACE**  
**(*Lactuca sativa*)**

| TESTE DE FITOTOXICIDADE – Alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) |                         |            |                           |                 |               |                    |
|------------------------------------------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| Antes do Ensaio de Respirometria                           |                         |            |                           | Medições        |               |                    |
| Nº de Identificação                                        | Tratamentos             | Triplicata | Nº de Sementes Germinadas | Hipocótilo (mm) | Radícula (mm) | Tamanho Total (mm) |
| 1                                                          | ETE                     | A          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            |                         | B          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            |                         | C          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
| 2                                                          | ETA                     | A          | 10                        | 2,21            | 1,47          | 3,68               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 2,27            | 1,08          | 3,35               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 2,04            | 1,33          | 3,37               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 2,17            | 1,29          | 3,47               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,12            | 0,20          | 0,19               |
| 3                                                          | SOLO                    | A          | 10                        | 1,81            | 1,50          | 3,31               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 2,39            | 1,83          | 4,22               |
|                                                            |                         | C          | 8                         | 0,94            | 0,69          | 1,63               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,71            | 1,34          | 3,05               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,73            | 0,59          | 1,31               |
| 4                                                          | SOLO + ETE 5%           | A          | 9                         | 2,69            | 1,94          | 4,63               |
|                                                            |                         | B          | 9                         | 2,15            | 1,18          | 3,33               |
|                                                            |                         | C          | 8                         | 1,61            | 0,93          | 2,54               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 2,15            | 1,35          | 3,50               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,54            | 0,53          | 1,06               |
| 5                                                          | SOLO + ETA 5%           | A          | 8                         | 1,88            | 1,29          | 3,17               |
|                                                            |                         | B          | 9                         | 1,93            | 1,35          | 3,28               |
|                                                            |                         | C          | 10                        | 2,00            | 1,42          | 3,42               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,94            | 1,35          | 3,29               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,06            | 0,07          | 0,13               |
| 6                                                          | SOLO + ETA 10%          | A          | 9                         | 1,76            | 1,26          | 3,02               |
|                                                            |                         | B          | 9                         | 2,05            | 1,53          | 3,58               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 1,84            | 1,16          | 3,00               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,88            | 1,32          | 3,20               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,15            | 0,19          | 0,33               |
| 7                                                          | SOLO + ETA 15%          | A          | 8                         | 1,28            | 0,96          | 2,24               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 2,62            | 1,89          | 4,51               |
|                                                            |                         | C          | 8                         | 1,37            | 0,80          | 2,17               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,76            | 1,22          | 2,97               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,75            | 0,59          | 1,33               |
| 8                                                          | SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | A          | 9                         | 2,20            | 1,56          | 3,76               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 1,84            | 1,56          | 3,40               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 2,29            | 1,22          | 3,51               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 2,11            | 1,45          | 3,56               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,24            | 0,20          | 0,18               |
| 9                                                          | SOLO + ETE 5% + ETA 10% | A          | 9                         | 2,11            | 1,52          | 3,63               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 2,24            | 1,14          | 3,38               |
|                                                            |                         | C          | 8                         | 1,64            | 0,87          | 2,51               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 2,00            | 1,18          | 3,17               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,32            | 0,33          | 0,59               |
| 10                                                         | SOLO + ETE 5% + ETA 15% | A          | 10                        | 1,88            | 1,64          | 3,52               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 1,48            | 0,66          | 2,14               |
|                                                            |                         | C          | 6                         | 1,00            | 0,57          | 1,57               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,45            | 0,96          | 2,41               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,44            | 0,59          | 1,00               |

| TESTE DE FITOTOXICIDADE - Alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) |                         |            |                           |                 |               |                    |
|------------------------------------------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| Depois do Ensaio de Respirometria                          |                         |            |                           | Medições        |               |                    |
| Nº de Identificação                                        | Tratamentos             | Triplicata | Nº de sementes Germinadas | Hipocótilo (mm) | Radícula (mm) | Tamanho Total (mm) |
| 11                                                         | SOLO                    | A          | 8                         | 1,88            | 1,62          | 3,50               |
|                                                            |                         | B          | 8                         | 2,11            | 1,86          | 3,97               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 1,84            | 1,56          | 3,40               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,94            | 1,68          | 3,62               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,15            | 0,16          | 0,30               |
| 12                                                         | SOLO + ETE 5%           | A          | 10                        | 0,42            | 0,48          | 0,90               |
|                                                            |                         | B          | 8                         | 0,46            | 0,50          | 0,96               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 0,39            | 0,40          | 0,79               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 0,42            | 0,46          | 0,88               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,04            | 0,05          | 0,09               |
| 13                                                         | SOLO + ETA 5%           | A          | 8                         | 1,81            | 1,04          | 2,85               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 2,60            | 1,94          | 4,54               |
|                                                            |                         | C          | 10                        | 1,86            | 1,33          | 3,19               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 2,09            | 1,44          | 3,53               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,44            | 0,46          | 0,89               |
| 14                                                         | SOLO + ETA 10%          | A          | 10                        | 2,07            | 1,59          | 3,66               |
|                                                            |                         | B          | 9                         | 2,20            | 1,45          | 3,65               |
|                                                            |                         | C          | 8                         | 1,72            | 1,27          | 2,99               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 2,00            | 1,44          | 3,43               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,25            | 0,16          | 0,38               |
| 15                                                         | SOLO + ETA 15%          | A          | 9                         | 2,90            | 1,80          | 4,70               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 2,48            | 1,55          | 4,03               |
|                                                            |                         | C          | 10                        | 2,82            | 1,49          | 4,31               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 2,73            | 1,61          | 4,35               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,22            | 0,16          | 0,34               |
| 16                                                         | SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | A          | 10                        | 2,11            | 2,05          | 4,16               |
|                                                            |                         | B          | 9                         | 2,34            | 2,30          | 4,64               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 1,42            | 1,10          | 2,52               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,96            | 1,82          | 3,77               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,48            | 0,63          | 1,11               |
| 17                                                         | SOLO + ETE 5% + ETA 10% | A          | 8                         | 1,43            | 1,14          | 2,57               |
|                                                            |                         | B          | 9                         | 1,72            | 1,14          | 2,86               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 2,30            | 1,66          | 3,96               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,82            | 1,31          | 3,13               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,44            | 0,30          | 0,73               |
| 18                                                         | SOLO + ETE 5% + ETA 15% | A          | 7                         | 1,04            | 0,65          | 1,69               |
|                                                            |                         | B          | 10                        | 2,75            | 2,23          | 4,98               |
|                                                            |                         | C          | 9                         | 2,03            | 1,37          | 3,40               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,94            | 1,42          | 3,36               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,86            | 0,79          | 1,65               |
| CN                                                         | CONTROLE NEGATIVO       | A          | 10                        | 1,52            | 1,33          | 2,85               |
|                                                            |                         | B          | 9                         | 1,19            | 0,75          | 1,94               |
|                                                            |                         | C          | 10                        | 1,34            | 1,48          | 2,82               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 1,35            | 1,19          | 2,54               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,17            | 0,39          | 0,52               |
| CP                                                         | CONTROLE POSITIVO       | A          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            |                         | B          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            |                         | C          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            | Média                   |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                            | Desvio Padrão           |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |

**APÊNDICE C – MEDIÇÕES DAS SEMENTES GERMINADAS DE RÚCULA (*Eruca sativa*)**

| TESTE DE FITOTOXICIDADE - Rúcula ( <i>Eruca sativa</i> ) |                         |            |                           |                 |               |                    |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| Antes do Ensaio de Respirometria                         |                         |            |                           | Medições        |               |                    |
| Nº de Identificação                                      | Tratamentos             | Triplicata | Nº de sementes Germinadas | Hipocótilo (mm) | Radícula (mm) | Tamanho Total (mm) |
| 1                                                        | ETE                     | A          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          |                         | B          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          |                         | C          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
| 2                                                        | ETA                     | A          | 10                        | 2,57            | 3,01          | 5,58               |
|                                                          |                         | B          | 9                         | 2,76            | 2,51          | 5,27               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 2,88            | 3,14          | 6,02               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,74            | 2,89          | 5,62               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,16            | 0,33          | 0,38               |
| 3                                                        | SOLO                    | A          | 10                        | 3,06            | 3,96          | 7,02               |
|                                                          |                         | B          | 8                         | 2,45            | 3,18          | 5,63               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 2,52            | 3,42          | 5,94               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,68            | 3,52          | 6,20               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,33            | 0,40          | 0,73               |
| 4                                                        | SOLO + ETE 5%           | A          | 9                         | 2,47            | 3,51          | 5,98               |
|                                                          |                         | B          | 8                         | 2,34            | 3,65          | 5,99               |
|                                                          |                         | C          | 10                        | 2,91            | 3,06          | 5,97               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,57            | 3,41          | 5,98               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,30            | 0,31          | 0,01               |
| 5                                                        | SOLO + ETA 5%           | A          | 10                        | 2,39            | 3,88          | 6,27               |
|                                                          |                         | B          | 8                         | 2,08            | 2,73          | 4,81               |
|                                                          |                         | C          | 10                        | 2,32            | 3,88          | 6,20               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,26            | 3,50          | 5,76               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,16            | 0,66          | 0,82               |
| 6                                                        | SOLO + ETA 10%          | A          | 6                         | 1,58            | 2,63          | 4,21               |
|                                                          |                         | B          | 10                        | 2,68            | 4,07          | 6,75               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 2,46            | 3,42          | 5,88               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,24            | 3,37          | 5,61               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,58            | 0,72          | 1,29               |
| 7                                                        | SOLO + ETA 15%          | A          | 8                         | 2,14            | 2,48          | 4,62               |
|                                                          |                         | B          | 7                         | 1,50            | 1,42          | 2,92               |
|                                                          |                         | C          | 10                        | 2,52            | 3,72          | 6,24               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,05            | 2,54          | 4,59               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,52            | 1,15          | 1,66               |
| 8                                                        | SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | A          | 10                        | 2,70            | 2,83          | 5,53               |
|                                                          |                         | B          | 9                         | 2,51            | 2,49          | 5,00               |
|                                                          |                         | C          | 10                        | 2,74            | 2,04          | 4,78               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,65            | 2,45          | 5,10               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,12            | 0,40          | 0,39               |
| 9                                                        | SOLO + ETE 5% + ETA 10% | A          | 7                         | 2,33            | 2,71          | 5,04               |
|                                                          |                         | B          | 6                         | 1,33            | 1,26          | 2,59               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 2,22            | 2,17          | 4,39               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 1,96            | 2,05          | 4,01               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,55            | 0,73          | 1,27               |
| 10                                                       | SOLO + ETE 5% + ETA 15% | A          | 9                         | 2,48            | 2,57          | 5,05               |
|                                                          |                         | B          | 10                        | 3,51            | 3,42          | 6,93               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 2,42            | 2,99          | 5,41               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,80            | 2,99          | 5,80               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,61            | 0,43          | 1,00               |

| TESTE DE FITOTOXICIDADE - Rúcula ( <i>Eruca sativa</i> ) |                         |            |                           |                 |               |                    |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| Depois do Ensaio de Respirometria                        |                         |            |                           | Medições        |               |                    |
| Nº de Identificação                                      | Tratamentos             | Triplicata | Nº de sementes Germinadas | Hipocótilo (mm) | Radícula (mm) | Tamanho Total (mm) |
| 11                                                       | SOLO                    | A          | 10                        | 2,16            | 5,28          | 7,44               |
|                                                          |                         | B          | 7                         | 1,78            | 2,44          | 4,22               |
|                                                          |                         | C          | 10                        | 1,60            | 3,50          | 5,10               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 1,85            | 3,74          | 5,59               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,29            | 1,44          | 1,66               |
| 12                                                       | SOLO + ETE 5%           | A          | 9                         | 0,81            | 1,26          | 2,07               |
|                                                          |                         | B          | 10                        | 0,88            | 1,76          | 2,64               |
|                                                          |                         | C          | 7                         | 0,67            | 0,67          | 1,34               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 0,79            | 1,23          | 2,02               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,11            | 0,55          | 0,65               |
| 13                                                       | SOLO + ETA 5%           | A          | 9                         | 1,52            | 2,41          | 3,93               |
|                                                          |                         | B          | 10                        | 1,91            | 3,10          | 5,01               |
|                                                          |                         | C          | 8                         | 1,05            | 2,24          | 3,29               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 1,49            | 2,58          | 4,08               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,43            | 0,46          | 0,87               |
| 14                                                       | SOLO + ETA 10%          | A          | 10                        | 2,78            | 4,22          | 7,00               |
|                                                          |                         | B          | 7                         | 1,85            | 2,66          | 4,51               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 2,59            | 2,88          | 5,47               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,41            | 3,25          | 5,66               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,49            | 0,84          | 1,26               |
| 15                                                       | SOLO + ETA 15%          | A          | 10                        | 3,32            | 2,68          | 6,00               |
|                                                          |                         | B          | 8                         | 2,88            | 3,75          | 6,63               |
|                                                          |                         | C          | 10                        | 3,43            | 3,46          | 6,89               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 3,21            | 3,30          | 6,51               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,29            | 0,55          | 0,46               |
| 16                                                       | SOLO + ETE 5% + ETA 5%  | A          | 7                         | 2,60            | 2,66          | 5,26               |
|                                                          |                         | B          | 10                        | 3,46            | 4,50          | 7,96               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 3,30            | 3,62          | 6,92               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 3,12            | 3,59          | 6,71               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,46            | 0,92          | 1,36               |
| 17                                                       | SOLO + ETE 5% + ETA 10% | A          | 10                        | 3,04            | 3,15          | 6,19               |
|                                                          |                         | B          | 8                         | 2,66            | 2,97          | 5,63               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 2,57            | 3,11          | 5,68               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,76            | 3,08          | 5,83               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,25            | 0,09          | 0,31               |
| 18                                                       | SOLO + ETE 5% + ETA 15% | A          | 9                         | 3,41            | 4,25          | 7,66               |
|                                                          |                         | B          | 8                         | 3,36            | 3,46          | 6,82               |
|                                                          |                         | C          | 7                         | 2,59            | 2,89          | 5,48               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 3,12            | 3,53          | 6,65               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,46            | 0,68          | 1,10               |
| CN                                                       | CONTROLE NEGATIVO       | A          | 10                        | 1,81            | 2,08          | 3,89               |
|                                                          |                         | B          | 10                        | 2,20            | 3,28          | 5,48               |
|                                                          |                         | C          | 9                         | 1,99            | 3,00          | 4,99               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 2,00            | 2,79          | 4,79               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,20            | 0,63          | 0,81               |
| CP                                                       | CONTROLE POSITIVO       | A          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          |                         | B          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          |                         | C          | 0                         | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          | Média                   |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |
|                                                          | Desvio Padrão           |            |                           | 0,00            | 0,00          | 0,00               |