



**Universidade Federal do Oeste do Pará
Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas
Curso de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental**

NATHALIA COSTA SCHERER

**FITORREMEDIAÇÃO POR MACRÓFITA AQUÁTICA DA
AMAZÔNIA (*Eichhornia crassipes*) NO TRATAMENTO
TERCIÁRIO DE EFLUENTES DOMÉSTICO**

**Santarém – Pará
2018**

NATHALIA COSTA SCHERER

**FITORREMEDIAÇÃO POR MACRÓFITA AQUÁTICA DA
AMAZÔNIA (*Eichhornia crassipes*) NO TRATAMENTO
TERCIÁRIO DE EFLUENTES DOMÉSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Oeste do Pará – Campus de Santarém, como pré-requisito avaliativo da disciplina TCC II.

Área de concentração: Tratamento de Efluentes.

Orientador: Israel Nunes Henrique
Coorientadores: Lucieta Guerreiro Martorano e José Reinaldo Pacheco Peleja

**Santarém – Pará
2018**

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Nome do Autor: SCHERER, Nathalia Costa.

Título: Fitorremediação por macrófita aquática da Amazônia (*Eichhornia crassipes*) no tratamento terciário de efluentes doméstico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Oeste do Pará – Campus de Santarém, como requisito para a obtenção de título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Data da aprovação: 24/ abril /2018

Banca Examinadora

Orientador e Presidente
Prof^o. Dr. Israel Nunes Henrique
Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental/Universidade Federal do Oeste do Pará

Membro Titular
Prof^a. Dr. Alide Mitsue Watanabe Cova
Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental/Universidade Federal do Oeste do Pará

Membro Titular
Prof^a. M.Sc. Diani Fernanda da Silva Less
Curso Gestão Ambiental/Universidade Federal do Oeste do Pará

Aos meus amados pais Paulo Roberto Scherer e Ana Luzia Costa, por toda a luta para que este sonho se consolidasse, dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nunca deixar que eu desanimasse e perdesse a fé.

Aos meus pais Ana e Paulo e padrasto Roni Amaral. As minhas irmãs Anna Paula, Láisa e Anna Beatriz. Cunhado Vitor Scalabrin, Sobrinhos Daniele, Antonella e Bernardo. A minha vó paterna Anna Jacy Scherer por todo apoio durante meus estudos, tios e primos por todo o carinho e atenção durante toda minha caminhada até aqui.

Aos meus orientadores e coorientadores Prof^a Dra. Lucieta Guerreiro Martorano, Prof^o Dr. Israel Nunes Henrique e Prof^o Dr. José Reinaldo Pacheco Peleja, por todo o conhecimento, carinho, paciência e competência na minha construção como pesquisadora.

Aos meus amigos de graduação e profissão, em especial, David Rodrigues, Timóteo Ferreira, Samária Silva, Layane Minely por todo o companheirismo durante essa caminhada.

A minha amiga Pricila Xavier, por todo o colo nos momentos mais difíceis e toda a amizade que construímos ao longo dessa jornada que vem do ensino médio até a graduação.

A minha amiga de infância Katrinny Gualberto, obrigada por sempre me apoiar e me aturar em todos os momentos.

Aos amigos que deixaram a mensagem: “Não desiste agora, você ainda nem conquistou o mundo”

Ao Laboratório de Biologia Ambiental (LBA) e ao Laboratório de Tratamento de Águas Residuárias (LabTAR).

Aos funcionários e estagiários da EMBRAPA e a Rayanne Lima e Reinaldo Moraes por todo o auxílio na execução da pesquisa e análises.

A Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Tecnológica (Proppit), da Universidade Federal do Oeste do Pará pelo Programa de Fomento a Trabalhos de Conclusão de Curso.

Aos mestres, que formaram meu caráter profissional e serão sempre um norte a ser seguido.

RESUMO

A questão do esgotamento sanitário tem papel relevante no debate sobre a gestão dos recursos hídricos, uma vez que a ausência desse sistema de saneamento acarreta no transporte desses despejos ricos em nutrientes para corpos receptores, transformando-se em uma fonte potencial de poluição pontual, o que resulta em processos de eutrofização antrópica e, consequentemente mortandade da vida aquática. As tecnologias para a remoção dos constituintes nutricionais do esgoto sanitário representam normalmente altos custos de implementação e operação, provocando a busca por alternativas que apresentem melhor custo-benefício, como a aplicação da fitorremediação utilizando macrófitas aquáticas, sendo esta investigação o objetivo do presente estudo. Para o desenvolvimento da pesquisa foram dispostas macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes*, em um sistema hidropônico contendo dois tipos de tratamento, sendo eles, efluente tratado de uma estação de tratamento de esgoto doméstico e água de abastecimento usada como prova branca, onde foram mensurados o crescimento da espécie no sistema, por testes estatísticos de Regressão e ANOVA além da influência das condições ambientais de temperatura do ar, umidade relativa do ar e temperatura superficial foliar, termográficas. Assim como, as análises em laboratório das remoções dos seguintes nutrientes: fósforo total, fosfato, Nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito e DQO, e suas respectivas eficiências de remoção. Os resultados obtidos no experimento de remoção de nutrientes em duas amostragens foram de: Fósforo Total 88 e 85%; Fosfato 81 e 86%, Nitrogênio amoniacal total 91 e 97% , houve aumento de Nitrato e Nitrito e DQO nas concentrações. O crescimento de biomassa das macrófitas do sistema apresentou melhor desenvolvimento no tratamento contendo efluente doméstico, apresentando bom desempenho quanto as variáveis ambientais, temperatura e umidade relativa do ar, temperatura superficial foliar por meio das análises termográficas. A fitorremediação experimental com macrófitas aquáticas da Amazônia apresentou-se como uma eficiente alternativa para a implementação de unidades complementares em sistemas de tratamento de efluentes para as condições ambientais climáticas da região e alternativa de baixo custo na remoção de potenciais poluente de corpos hídricos.

Palavras-chaves: Recursos Hídricos; *Eichhornia crassipes*; Remoção de nutrientes.

ABSTRACT

The issue of sanitary sewage plays a relevant role in the debate on the management of water resources, since the absence of such a sanitation system results in the transportation of these nutrient-rich wastewater discharges to receiving bodies, becoming a potential source of point pollution. which results in processes of anthropic eutrophication and consequent mortality of aquatic life. The technologies for the removal of the nutritional constituents of the sanitary sewage usually represent high costs of implementation and operation, provoking the search for alternatives that are more cost-effective, such as the application of phytoremediation using aquatic macrophytes, being this research the objective of the present study. For the development of the research were arranged macrophytes of the species *Eichhornia crassipes*, in a hydroponic system containing two types of treatment, being treated effluent from a domestic sewage treatment station and supply water used as white test, where growth was measured of the species in the system, by statistical tests of Regression and ANOVA in addition to the influence of the environmental conditions of air temperature, relative air humidity and leaf surface temperature, thermographic. As well as, laboratory analyzes of the removal of the following nutrients: total phosphorus, phosphate, ammoniacal nitrate, nitrate, nitrite and COD, and their respective removal efficiencies. The results obtained in the experiment of nutrient removal in two samples were: Total Phosphorus 88 and 85%; Phosphate 81 and 86%, total ammoniacal nitrogen 91 and 97%, there was increase of Nitrate and Nitrite and COD in the concentrations. The biomass growth of the macrophytes of the system showed a better development in the treatment containing domestic effluent, presenting good performance as the environmental variables, temperature and relative humidity of the air, leaf surface temperature through thermographic analyzes. Experimental phytoremediation with aquatic macrophytes from Amazonia presented as an efficient alternative for the implementation of complementary units in effluent treatment systems for the climatic environmental conditions of the region and a low cost alternative in the removal of potential pollutants from water bodies.

Keywords: Water resources; *Eichhornia crassipes*; Removal of nutrients.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismos de fitorremediação. Fonte: Adaptado de Andrade, 2007	17
Figura 2: Etapas do processo de absorção de nutrientes do efluente de esgoto.....	19
Figura 3: Localização do experimento, Embrapa.	24
Figura 4: Mapa de localização do ponto de coleta das macrófitas aquáticas.	25
Figura 5 : A) Coleta das macrófitas no Lado do Maicá. B) Eichhornia crassipes no ambiente aquático	25
Figura 6: Mapa de localização e situação da ETE-UFOPA	26
Figura 7: Projeto da estação de tratamento de esgoto. Fonte: SINFRA-UFOPA, 2012.	26
Figura 8: Sistema hidropônico constituído por macrófitas aquáticas com dois tratamentos casualizados.	28
Figura 9: (A) Instalação do sistema (B) Ambiente onde o sistema foi instalado.....	29
Figura 10: (A) Macrófitas jovens dispostas de forma alternada no sistema. (B) Macrófitas no período de adaptação no sistema.	29
Figura 11: (A) Coleta para análise de pH Fig. (B) Análise de pH e temperatura do efluente e da água de abastecimento usados no sistema.	30
Figura 12: (A) Coleta das amostras compostas (B) Armazenamento das amostras.....	31
Figura 13: (A) Realização de amostragens termográfica durante o período experimental. (B) Câmera termográfica.	33
Figura 14: Imagem termográfica tratada.	33
Figura 15: Comportamento do pH da água e do efluente no sistema nas duas semanas de amostragem.	35
Figura 16: Eficiência média na remoção de fósforo total e fosfato.	37
Figura 17: Eficiência média da remoção de nitrogênio amoniacal total.	38
Figura 18: Concentração de nutrientes nitrogenados durante o experimento	39
Figura 19: Massa fresca das macrófitas durante o experimento nos dois tratamentos.	40
Figura 20: Desenvolvimento de biomassa fresca (A) Tratamento no efluente (B) Tratamento na água.....	41
Figura 21: Tamanho da parte aérea nos dois tratamentos.	42
Figura 22: Desenvolvimento da área foliar nos diferentes tratamentos nas colunas horizontais.	42
Figura 23: Desenvolvimento da raiz nos dois tratamentos, água e efluente.	43
Figura 24: Tamanho da raiz nos dois tratamentos.	43

Figura 25: Desenvolvimento de raiz durante duas medições (A) Segunda medição (B) Terceira medição.	44
Figura 26: Número de folhas nos dois tratamentos.....	44
Figura 27: Gráfico de temperatura média máxima e mínima do ar.	45
Figura 28: A) Macrófitas no início do experimento. B) Desenvolvimento da macrófitas no final do experimento sob condições ambientais e disponibilidade de nutrientes.	46
Figura 29: Perfil termográfico da superfície foliar (Inicial)	47
Figura 30: Perfil termográfico da superfície foliar (Final).....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1 ESGOTO SANITÁRIO	15
3.2 NUTRIENTES EM ESGOTO SANITÁRIO	15
3.3 FITORREMEDIAÇÃO.....	16
3.4 EICHHORNIA CRASSIPES NA FITORREMEDIAÇÃO DE NUTRIENTES.....	18
3.5 APLICAÇÕES DA <i>Eichhornia crassipes</i> (AGUAPÉ) NO TRATAMENTO DE EFLUENTES	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	24
4.2 MACRÓFITAS UTILIZADAS	24
4.3 EFLUENTE UTILIZADO NO EXPERIMENTO.....	26
4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	27
4.5 ANÁLISES DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICO DOS EFLUENTES	30
4.6 ANÁLISES DE BIOMASSA E CONDIÇÕES AMBIENTAIS	31
4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE NUTRIENTES DE EFLUENTES.....	35
5.1.1 Potencial hidrogeniônico – pH	35
5.1.2 DQO (Demanda Química de Oxigênio)	36
5.1.3 Fósforo Total e Fosfato	37
5.1.4 Amônia, Nitrito e Nitrato.....	38

5.2 ANÁLISE DE BIOMASSA E CONDIÇÕES AMBIENTAIS.....	40
5.2.1 Desenvolvimento de Biomassa	40
5.2.2 Condições Ambientais	45
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

A principal discussão acerca do uso dos recursos hídricos refere-se à busca de alternativas do seu melhor aproveitamento e gestão, onde a questão do esgotamento sanitário tem papel relevante nesse debate. A concentração do homem no meio urbano favorece a produção elevada do volume de esgoto sanitário, seja doméstico ou industrial, não havendo o tratamento adequado levantam-se preocupações sobre os possíveis impactos ambientais e consequentemente riscos à saúde humana, sendo reflexo da falta de planejamento ambiental, social e urbano (PHILIPPI JR, 2005; FUNASA, 2014).

Os inconvenientes no lançamento de esgoto sanitário em corpos d'água estão relacionados a presença de vários tipos de poluentes orgânicos e inorgânicos. A presença de nitrogênio e fósforo em águas residuárias é mais comum, afetando a disponibilidade e qualidade, com a poluição das águas superficiais e subterrâneas devido o lançamento de esgoto *in natura* ou tratados, que estejam fora dos padrões de lançamento estabelecidos pela legislação ambiental vigente (NUVOLARI et al., 2011).

O nitrogênio e o fósforo, são macronutrientes normalmente encontrados em ecossistemas aquáticos, com tudo em excesso, podem provocar problemas ambientais. Entre esses a eutrofização antrópica, a redução de oxigênio dissolvido no meio e a mortandade da vida aquática, são os mais frequentes, todos ocasionados por fontes de poluição difusas e pontuais, sendo a última facilmente identificada pelo lançamento de águas residuárias em corpos hídricos (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Na busca por solucionar tais potenciais impactos, as estações de tratamento de esgoto passaram a ser planejadas não apenas para a remoção de matéria orgânica, mas também para outros constituintes do esgoto sanitário. Assim melhorando a configuração das estações de tratamento de esgoto, aumentando a complexidade e número de processos físicos, químicos e biológicos, sendo estendida à remoção principalmente de formas nitrogenada e fosfatadas (ROCHA, 2009).

Atualmente, existem diversas tecnologias para melhor remoção de nutrientes em sistemas de tratamento de esgoto, no entanto, as técnicas normalmente aplicadas podem representar altos custos de implantação, operação e manutenção. Diante dessas restrições, destaca-se a necessidade da procura por alternativas que resultem na maior remoção de nutrientes e que apresentem maior custo-benefício em sua concepção. Pode-se destacar a fitorremediação que utiliza macrófitas aquáticas para a redução das cargas de potenciais poluentes inorgânicos, metais

pesados, substâncias tóxicas, além de microrganismos patógenos (ALMEIDA e ALMEIDA, 2005).

Dentre as plantas aquáticas com alto potencial na produção de biomassa e incorporação de nutrientes e agentes tóxicos, a mais utilizada e que apresenta maior desempenho no tratamento de efluentes é o Aguapé (*Eichhornia crassipes*). Entretanto, tais métodos de remoção de constituintes do esgoto sanitário são dependentes das condições ambientais para o seu desenvolvimento e consequentemente eficiência na aplicação, podendo apresentar diferentes comportamentos. Sendo necessário a avaliação de tais variáveis, como temperatura, umidade do ar e incidência solar, esses importantes fatores para a garantia das atividades metabólicas da planta (MEDEIROS ET AL., 1986; WEIRICH, 2009).

Nesse contexto, a avaliação da capacidade de fitorremediação sob determinadas condições ambientais pode potencializar o uso de macrófitas aquáticas como a *Eichhornia crassipes* na remoção de nutrientes e mitigar efeitos danosos de lançamentos de efluentes domésticos fora dos padrões de qualidade estabelecidos pelas leis ambientais vigentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade e condições ambientais para a aplicação da fitorremediação por macrófitas aquáticas (*Eichonnia crassipes*) para a remoção de nutrientes em efluentes domésticos tratados na estação de tratamento de esgoto da Universidade Federal do Oeste do Pará.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir sistema hidropônico para avaliar a capacidade de fitorremediação de macrófitas aquáticas;
- Avaliar a eficiência da *Eichonnia crassipes* no tratamento de efluentes a partir dos testes de parâmetros físico-químicos para remoção de nutrientes;
- Analisar o crescimento de biomassa da espécie relacionando as condições ambientais e remoção de nutrientes do efluente.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ESGOTO SANITÁRIO

Esgoto sanitário é, essencialmente, a água de abastecimento de uma determinada população de consumo, após o seu uso oriundo de várias aplicações, contendo constituintes que, sem tratamento, a torna imprópria para a maioria dos usos, por dispor da decomposição de matéria orgânica nele contido que resulta em condições desagradáveis, incluindo produção de gases com maus odores, diversos organismos patogênicos prejudiciais à saúde pública, além de nutrientes que podem ser altamente prejudiciais a qualidade ambiental de corpos hídricos receptores (METCALF; EDDY, 2015).

Philippi et al., (2005) classifica os tipos de esgoto sanitário em área urbana de acordo com a fonte, em três categorias: esgotos domésticos (residências, comércio e instituições públicas); esgotos industriais (fábricas e indústrias); e esgotos especiais (hospitais, *shopping centers* e aeroportos), cujas especificidades podem demandar gerenciamentos e tratamentos diferenciados.

Os esgotos domésticos, compõem-se, basicamente das águas servidas, urina, fezes, restos de comida, sabões e detergentes. Esses efluentes cometem aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos, sendo esta última fração composta por sólidos orgânicos como proteínas, carboidratos e lipídios; inorgânicos como a amônia, nitrato, ortofosfato e microrganismos como bactéria, fungos, protozoários, vírus e helmintos (HENZE et al., 1995; BRAGA, 2005).

3.2 NUTRIENTES EM ESGOTO SANITÁRIO

As concentrações médias de nutrientes encontrados no esgoto sanitário são: Nitrogênio total, 35mg.L^{-1} ; Nitrogênio inorgânico, 15mg.L^{-1} e Fósforo total, 10mg.L^{-1} , podendo variar de localidade e costumes da população (METCALF; EDDY, 2015). Em tratamentos biológicos tais concentrações apresentam uma importância significativa na relação carbono/nitrogênio/fósforo, pois esta proporção garante o crescimento bacteriano nesse tipo de tratamento (MIHELIC et al., 2012). No entanto, efluentes domésticos ou industriais, tratados por esses sistemas convencionais, têm como principal finalidade a remoção de matéria orgânica e nutrientes, tais como nitrogênio e fósforo. Essas concentrações em efluentes precisam atender às exigências de

lançamento nos corpos d'água, que também influenciam no agrave a diluição do esgoto no corpo receptor (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Segundo Cardoso (2016), as formas mais comuns do nitrogênio (N) presentes em efluentes são as proteínas, os aminoácidos e a ureia, que por ação de microrganismos nos tratamentos biológicos, são rapidamente transformados em nitrogênio amoniacal, sendo encontrado na forma de íon amônio (NH_4^+) ou gás de amônia (NH_3), gerando sérios impactos ambientais se lançado em corpos d'água sem a devida remoção.

Assim como o nitrogênio, o fósforo (P), atualmente, é um dos elementos mais visado quanto aos problemas de poluição hídrica, e encontrado no esgoto doméstico como fosfatos, nas formas inorgânica, polifosfatos e ortofosfatos, de origem principal nos detergentes e outros produtos químicos domésticos e orgânicos, ligada a compostos orgânicos, como proteínas e existem também nas fezes humanas (NUVOLARI, 2011).

Essas composições, dos esgotos exercem ação deletéria nos corpos d'água, a matéria orgânica pode ocasionar a exaustão do oxigênio dissolvido, causando morte de peixes e outros organismos aquáticos, escurecimento da água e aparecimento de maus odores. Já os nutrientes exercem uma intensa fertilização da água, provocando o crescimento acelerado de algas ocasionando processos de eutrofização (BRAGA et al., 2005).

Atualmente, existem diversas tecnologias para melhor remoção de nutrientes em sistemas de tratamento de esgoto que buscam solucionar os impactos da eutrofização antrópica nos corpos receptores. No entanto, as técnicas normalmente aplicadas podem representar altos custos de implantação, operação e manutenção. Diante dessas restrições, destaca-se a necessidade da procura por alternativas que resultem na maior remoção dos principais nutrientes, N e P, podendo destacar a fitorremediação que utiliza macrófitas aquáticas na redução das cargas de potenciais poluentes inorgânicos, metais pesados, substâncias tóxicas, além de microrganismos patogênicos (ALMEIDA e ALMEIDA, 2005; DIAS et al., 2016).

3.3 FITORREMEDIAÇÃO

Fitorremediação refere-se ao uso de plantas na descontaminação de solos e água com altos índices de contaminantes e poluição, principalmente com metais pesados, poluentes orgânicos e inorgânicos, reduzindo seus teores a níveis seguros à saúde humana, além de contribuir na melhoria das características físicas, químicas e biológicas destes ambientes (TAVARES, 2013). Esse processo consiste na aceleração da biodegradação, sendo que o seu procedimento dependerá

das condições do ambiente, estando limitada à disponibilidade de nutrientes, umidade, temperatura, pH, concentração de minerais e potencial redox (FERREIRA; MORITA, 2012). Além da presença de compostos orgânicos que influenciam diretamente na habilidade dos microrganismos simbióticos a fitorremediadora (ANDRADE et al., 2007; MARIANO, 2007).

A recuperação de áreas contaminadas pelas atividades antrópicas pode ser realizada por vários métodos. De acordo com Dinardi (2003), atualmente são preferidas as técnicas de descontaminação *in situ*, por perturbarem menos o meio ambiente, bem como, técnicas que sejam mais econômicas e que apresentem facilidades de aplicação. Nesse contexto, a fitorremediação surge como alternativa capaz de empregar sistemas vegetais fotossintetizantes e sua microbiota, com o fim de desintoxicar ambientes degradados ou poluídos.

Tavares (2009), descreveu os mecanismos de fitorremediação que atuam de forma direta ou indireta na redução e/ou remoção de contaminantes. Sendo que na forma direta os compostos são absorvidos e acumulados ou metabolizados nos tecidos, através da mineralização dos mesmos. Já na forma indireta, os vegetais extraem contaminantes reduzindo a fonte de contaminação ou quando a presença da planta propicia um meio favorável ao aumento da atividade microbiana capaz de realizar a degradação dos mesmos, tais mecanismos são classificados pelo autor e representados na figura 1:

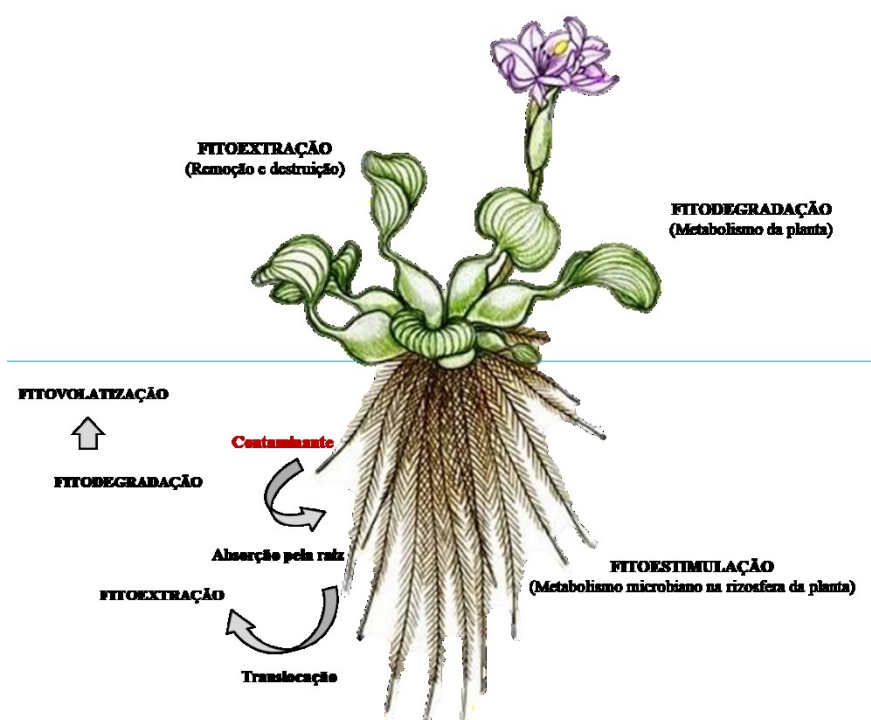


Figura 1: Mecanismos de fitorremediação. Fonte: Adaptado de Andrade, 2007

- **Fitoextração:** este mecanismo se refere à capacidade da planta em absorver o contaminante, armazená-lo em suas raízes ou em outros tecidos (folhas e caules), facilitando posteriormente seu descarte.
- **Fitotransformação:** neste mecanismo, a planta absorve o contaminante da água e do solo fazendo a sua bioconversão, no seu interior ou em sua superfície, para formas menos tóxicas. É empregado, principalmente, na remediação de compostos orgânicos.
- **Fitovolatilização:** a planta após absorver os contaminantes, provenientes do solo ou da água, converte-os para formas voláteis, sendo posteriormente liberados na atmosfera. A volatilização pode ocorrer pela biodegradação na rizosfera ou após a passagem na própria planta e dependendo da atuação ou não dos processos metabólicos, a liberação do contaminante para a atmosfera pode ocorrer na forma original ou transformada.
- **Fitoestimulação / rizodegradação:** neste mecanismo indireto, a planta estimula a biodegradação microbiana dos contaminantes presentes no solo ou na água, através de exsudados radiculares, fornecimento de tecidos vegetais como fonte de energia, sombreamento e aumento da umidade, favorecendo as condições ambientais para o desenvolvimento dos microrganismos.

A fitorremediação utiliza de sistemas vegetais para recuperar águas e solos contaminados, as macrófitas aquáticas são exemplos de vegetais largamente utilizados na descontaminação de água e efluentes. Segundo Pompêo e Moschini-Carlos (2003), macrófitas são vegetais vasculares, visíveis a olho nu com partes fotossinteticamente ativas permanentemente, ou por diversos meses do ano, total ou parcialmente submersas em água doce ou salobra, sendo classificadas em plantas emersas, flutuantes, submersas enraizadas, submersas livres e com folhas flutuantes.

As macrófitas aquáticas utilizadas nesse processo podem ser de dois tipos, emergentes e flutuantes. Para escolhê-las, deve-se observar os seguintes critérios: fácil propagação e crescimento rápido; alta capacidade de absorção de poluentes; tolerância a ambiente eutrofizado; fácil colheita e manejo e valor econômico (SOUZA et al., 2004).

A macrófita aquática que apresenta maior eficiência na fitorremediação, também denominada de fitodepuração, de massas de águas contaminadas, é a espécie *Eichhornia crassipes*. O emprego dessa planta como fitorremediadora oferece vantagens devido sua elevada capacidade de biomassa, uma vez que potenciais poluidores, como nutrientes, são absorvidos e convertidos em biomassa fresca de suas estruturas anatômicas, por meio do processo de fotossíntese (CÂMARA et al., 2015).

3.4 *Eichhornia crassipes* NA FITORREMEDIAÇÃO DE NUTRIENTES

Medeiros et al. (1986), comentaram que uma das espécies mais promissoras no tratamento de efluentes é a *E. crassipes* (Aguapé), por apresentar a capacidade de fixar em seus tecidos

nutrientes em quantidades superiores às suas necessidades, bem como elementos químicos estranhos ao seu metabolismo. Esteves e Menezes (2011), também abordaram a enorme capacidade desta planta em absorver e armazenar maiores concentrações de potássio, nitrogênio e fósforo.

A utilização da *Eichhornia crassipes* na fitorremediação de efluentes de esgoto doméstico atua diretamente na remoção de nutrientes, os quais são absorvidos por um processo que envolve três etapas: física, bioquímica e metabólica relacionadas anatomia e fisiologia de suas estruturas (Figura 2).

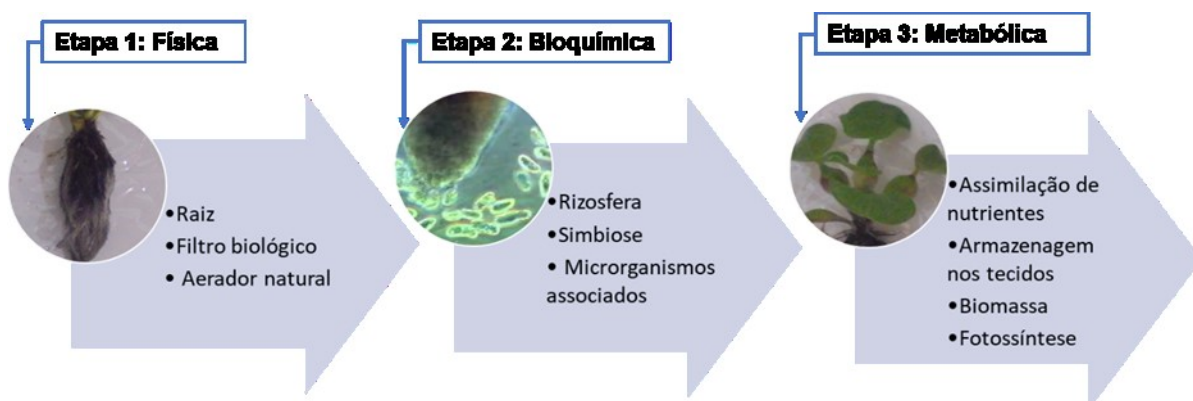


Figura 2: Etapas do processo de absorção de nutrientes do efluente de esgoto.

A *E. crassipes* é uma planta herbácea com brotamento lateral de estolões, raízes abundantes na parte inferior, estrutura essa que age como filtro biológico. Provida de folhas aéreas com pecíolos inflamados a partir de sua metade até a base, cuja parte interna é constituída de tecido aerenquimatoso (ALBURQUERQUE, 1981), essa característica de tecido aerenquimático foi descrito por Esteves (2011), em seus estudos de ETE-Verdes, o qual confirma essa estrutura, quando bem desenvolvida, ser capaz de transportar grande quantidade de oxigênio para a raiz por difusão e auxiliar no processo de desnitrificação, quando adotadas no tratamento de esgoto.

A nitrificação-desnitrificação nas raízes e rizomas das macrófitas é favorecido pela difusão de oxigênio, que formam microsítios aeróbios, e a água residuária fluindo através das raízes tem a oportunidade de estar em contato com esses locais aeróbios em um meio que em sua grande parte é anaeróbio, assim favorecendo o desenvolvimento de bactérias responsáveis por esse processo, pela rota tradicional de conversão a nitrogênio gasoso (REDDY; D'ANGELO et al., 1998; VON SPERLING, 2005; ESTEVES, 2011).

A relação nitrogênio-planta, corresponde a variedade de processos biológicos de organismos simbiotes ou semissimbiotes junto a rizosfera, que convertem formas inorgânicas do

nitrogênio para compostos orgânicos que servem de reserva para as células e tecidos das macrófitas. As duas formas de nitrogênio geralmente utilizadas são a amônia e o nitrato. Porém, a amônia, por ser mais reduzida energeticamente do que o nitrato, torna-se fonte preferencial. Contudo, em ambientes onde o nitrato é predominante ele será, então, a maior fonte de nitrogênio passível de assimilação, garantindo assim a remoção desses constituintes em efluentes de esgoto sanitário (ALVES et al., 2003).

Já a remoção de fósforo pelas macrófitas presente nas águas residuárias, quer seja na forma iônica ou complexada, encontra-se, geralmente, como fosfato e sua remoção por disposição dos esgotos em sistemas constituídos por macrófitas é controlada pelos processos biótico e abiótico (REDDY et al., 1999). Em soluções aquosas como as condições de efluentes de esgoto sanitário, as formas mais usuais do fósforo incluem os ortofosfatos, polifosfato e fósforo orgânico. Os ortofosfatos, estão diretamente disponíveis para o metabolismo biológico, como o das macrófitas, sem necessidade de conversão a forma mais simples. Já o polifosfato e o fósforo orgânico são convertidos em ortofosfato e este, por sua vez, pela decomposição biológica de organismos associados, se transforma em fosfatos (METCALF; EDDY, 2015)

Segundo Bento et al., (2007), o fósforo na forma de fosfato absorvido pela macrófita é em parte incorporado à sua biomassa e outra parte é excretado para a água, sendo uma parcela relevante do fósforo presente na biomassa da planta não disponibilizada novamente ao ambiente, ficando retida. Alguns estudos abordados por Esteves e Panosso (2011), apontam que o fosfato é assimilado pelas raízes e distribuído por toda a planta, outros indicaram que o fosfato é assimilado pelas folhas e distribuído, ou absorvidos por ambas as estruturas da planta. Após a macrófita absorver os nutrientes, na etapa metabólica ou fisiológica há a transformação desses compostos em biomassa ou matéria verde durante o processo de fotossíntese da planta (KISSMANN; GROTH 1992).

3.4.1 Biomassa das macrófitas

Em condições ideais, as macrófitas aquáticas possuem elevada taxa de crescimento em um reduzido período. Espécies flutuantes livres crescem proficuamente, principalmente quando as concentrações de nutrientes são favoráveis, como a *Eichhornia crassipes* que apresenta tempos de duplicação de biomassa entre 3 e 5 dias (THOMAZ; ESTEVES, 2011). Quando utilizadas em sistemas de tratamento de efluentes como fitorremediadoras é necessário o controle de retirada de biomassa, que deverá ser constante, pois quando o aguapé ultrapassa uma determinada densidade, sua taxa de crescimento tende a decrescer e, conseqüentemente, diminuem suas

atividades biológicas relacionadas à assimilação de substâncias poluidoras (KAWAI; GRIECO, 1983).

Além da necessidade de retirada da biomassa, outra desvantagem destacada por Pompêo (2008), refere-se ao fato das macrófitas assimilarem metais pesados e outras substâncias tóxicas, transferindo o problema da contaminação para a planta e a destinação final do resíduo gerado nesse processo, já que periodicamente há necessidade de manejo da planta no ambiente. No entanto, inúmeros estudos têm comprovado a eficiência do emprego dessa biomassa removida como fertilizante orgânico através da compostagem, destacando os cuidados com concentrações de compostos tóxicos como metais pesados incorporados a planta (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2008). Outra alternativa é a inserção da matéria gerada na produção de gases em biodigestor, principalmente o metano, mostra potencial para a obtenção de biogás a partir da biomassa da *E. crassipes* (PEREIRA et al, 2000).

Os principais padrões de crescimento da biomassa dessas plantas estão relacionados a fisiologia das macrófitas e as condições ambientais, como luminosidade, pH, alcalinidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes e processos ecológicos sobre uma população ou indivíduo, variáveis abióticas e bióticas que atuam em conjunto (CAMARGO ET AL., 2003).

Dentre esses padrões, segundo Pastore et al. (1995, APUD CAMARGO ET AL., 2003), a disponibilidade de luz e a temperatura são duas variáveis que influenciam diretamente o crescimento de macrófitas aquáticas. Esses vegetais possuem ampla tolerância à temperatura, uma vez que ocorrem desde ambientes tropicais, sendo que temperaturas elevadas favorecem o desenvolvimento de diversas espécies, a temperaturas mais baixas.

3.4.2 Condições ambientais

Entre os fatores determinantes nos estudos com macrófitas aquáticas devem ser consideradas as condições ambientais relacionadas ao desenvolvimento da planta, quando aplicada na remoção de constituintes inorgânicos presentes no efluente.

a) Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura e a umidade do ar expressam as condições do ambiente, que influenciam a produtividade primária das macrófitas, Esteves (2011), afirma que essa produtividade está relacionada diretamente à quantidade de nutriente disponível, a elementos climáticos e à intensidade luminosa incidente sobre elas. Para Wetzel (2001) o desenvolvimento da macrófita varia em relação às mudanças de temperatura e irradiação em ambientes naturais, sendo a

eficiência da fotossíntese, fixação de carbono, respiração e a fotorrespiração são, marcadamente, relacionadas à luz e temperatura.

a) Temperatura da superfície foliar (Termografia)

A temperatura é um dos fatores que determinam a velocidade dos processos metabólicos nas plantas (BERRY; BJORKMAN, 1980). Altas temperaturas favorecem a produção primária por acelerarem as reações metabólicas nas plantas, apresentando-se como respostas fisiológicas, sendo assim uma variável importante no controle do crescimento e da atividade fotossintética das macrófitas aquáticas (BIUDES; CARMARGO et al., 2008).

A temperatura da superfície foliar, consiste na radiação infravermelha emitida pela planta. Essa radiação é dependente da temperatura foliar e da capacidade de emitir radiação, conhecida como emissividade. Desse modo, a termografia infravermelho permite visualizar a temperatura na área foliar das plantas, bem como do ambiente (MENDONÇA, 2005). A obtenção dos dados é garantida por imagens termográficas processadas em um software, que transforma os valores da radiação obtida nas imagens em níveis de temperatura que são representados por um gradiente de falsa-cor (CHAERLE; VAN DER STRAETEN, 2000).

3.5 APLICAÇÕES DA *Eichhornia crassipes* (AGUAPÉ) NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Segundo Tomaz e Esteves (2011), vários estudos têm mostrado a possibilidade da utilização de macrófitas aquáticas na eliminação de compostos ligados a processos de eutrofização como o fosfato, amônia e nitrato. Colaborando nesse processo, pois a redução das cargas de poluentes é realizada em conjunto com microrganismos associados às macrófitas em ambientes aquáticos empregados para reduzir cargas de efluentes domésticos, industriais, da pecuária e aquicultura.

Em experimentos realizados por Henry-Silva e Camargo (2006), onde utilizou duas espécies de macrófitas aquáticas na remoção de nutrientes, a *E. crassipes*, que removeu 82% do fósforo e 46% do Nitrogênio orgânico total, enquanto que a *P. stratiotes* removeu 83% do fósforo e 44% do nitrogênio orgânico total no tratamento do efluente de aquicultura, de um viveiro de criação de tilápia.

Outra investigação da mesma natureza foi realizada por Freitas (2010), que consistiu na utilização da espécie *E. crassipes* na biorremediação de efluentes de piscicultura, onde obteve a

eficiência de remoção de nitrogênio inorgânico e fósforo total de 70,9% e 85,8% respectivamente, apresentando um aumento de biomassa úmida de 132,8% ao final do experimento.

No estudo de Mees (2009), o objetivo da investigação foi a aplicação *in situ* da *E. Crassipes* na lagoa de estabilização de um sistema de tratamento de efluentes de matadouro e frigorífico, com relação a remoção de nutrientes, observou-se uma remoção média de nitrogênio total de 21,2% com máxima de 87,9% e de fósforo total 11,1% e máxima de 38,9%, para um tempo médio de retenção de cinco dias.

Já nos estudos de Castro (2017), a mesma macrófita foi comparada com a espécie *Salvina auriculata*, aplicadas no tratamento de efluentes de laticínio em sistemas de zonas úmidas, cujo objetivo foi avaliar a eficiência como alternativa de biorremediação de efluentes industriais. Os resultados obtidos comprovaram que a *E. crassipes* se comportou como melhor biorremediadora a partir das análises dos parâmetros de turbidez, nitrogênio total e DQO de 94,4%, 90,26% e 82%, respectivamente.

Jonas e Hussar (2010), avaliaram o uso do Aguapé no pós-tratamento de água residuária de suinocultura tratados em Reator Anaeróbio Compartilhado (RAC), o qual foi mensurado as remoções de DQO, nitrato, nitrogênio amoniacal e fósforo total com as respectivas eficiências médias de 61,9%, 70,4%, 78,2% e 74,8% de remoção, considerando tais resultados muito satisfatórios.

A aplicação do aguapé da espécie *E. crassipes* também foi avaliado no tratamento terciário de esgoto doméstico por Barros et al. (2015), na remoção de nutrientes em uma Wetlands construída povoada pela espécie, durante 21 dias, alcançando uma redução para DQO, DBO e fósforo total de 78,9; 77,5 e 63,6%, respectivamente.

Greco (2010), realizou um estudo exploratório de macrófitas aquáticas no potencial de fitorremediação de nitrogênio amoniacal (NH_4^+) de efluente da estação de tratamento da Universidade de Santa Cruz do Sul, utilizando 7 espécies de macrófitas, dentre essas a *E. crassipes*, apresentou-se como a segunda melhor fitorremediadora, com eficiência na remoção de 87% de NH_4^+ .

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido durante os meses de março e abril de 2018, na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), localizada na área urbana do Município de Santarém-PA, Bairro da Cohab, próximo à Rodovia Curuá-Una (PA-370) (Figura 3).

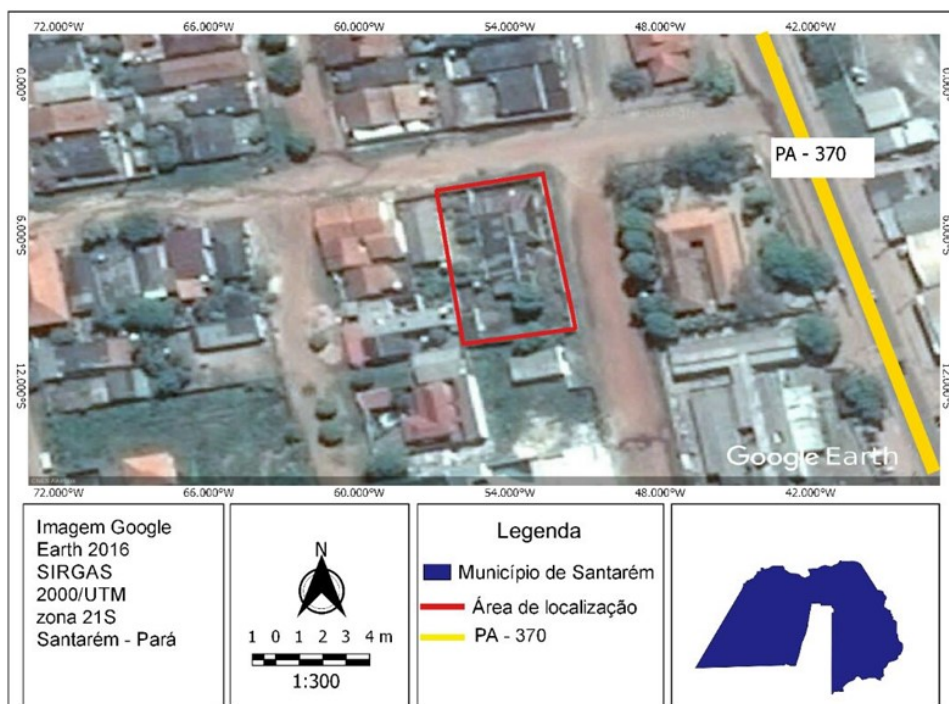


Figura 3: Localização do experimento, Embrapa.

4.2 MACRÓFITAS UTILIZADAS

A coleta das macrófitas foi realizada no dia 12 de março, no Lago do Maicá, localizado no perímetro urbano da cidade de Santarém, Estado do Pará, as proximidades do bairro Jaderlândia, as margens da Rodovia Curuá-Una (PA-370), Km 07 (Figura 4). O mesmo abrange uma área aquática de 161Km² e está inserido em uma região de várzea, composta por áreas

periodicamente inundáveis (ISAAC; CERDEIRA, 2004), optou-se por esse ambiente por apresentar menor influência de poluição antrópica no local da coleta e abundância da espécie.

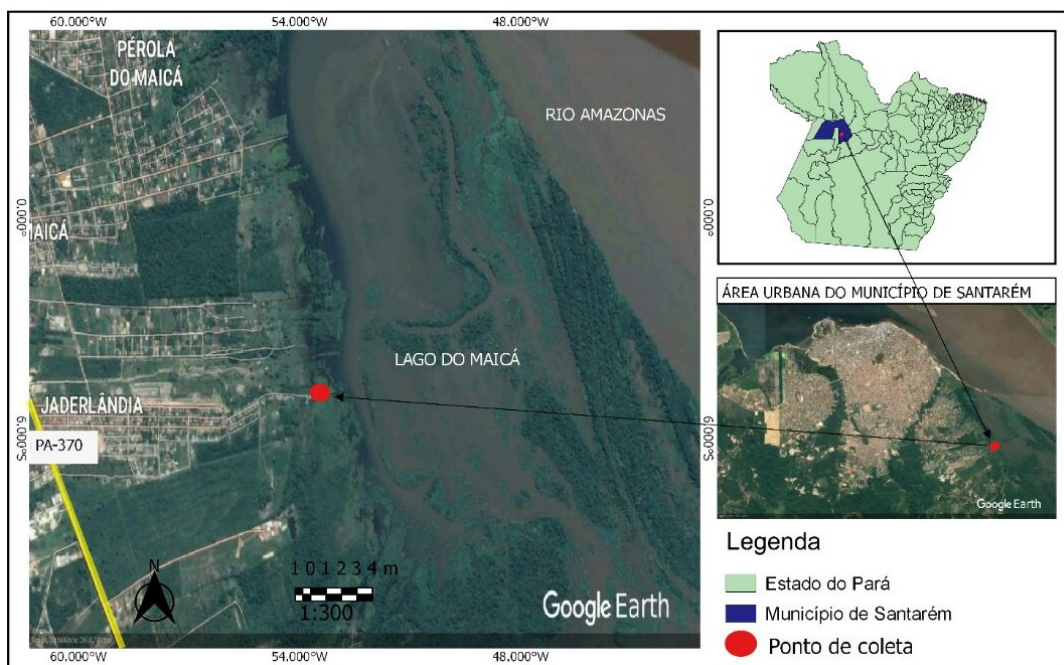


Figura 4: Mapa de localização do ponto de coleta das macrófitas aquáticas.

A espécie de macrófita coletada para o experimento foi a *Eichhornia crassipes* conhecida popularmente como Aguapé ou Mureru, natural da Região Amazônica. Durante o procedimento de coleta foram selecionadas as plantas mais jovens no ambiente, devido sua maior capacidade de absorção de nutrientes e contaminantes, bem como, o desenvolvimento da planta no experimento (figura 5)



Figura 5 : A) Coleta das macrófitas no Lado do Maicá. B) *Eichhornia crassipes* no ambiente aquático

4.3 EFLUENTE UTILIZADO NO EXPERIMENTO

O efluente utilizado foi da estação de tratamento de esgoto doméstico, da Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Santarém, Unidade Rondon, localizada Município de Santarém-PA, situa-se na área urbana, na Avenida Marechal Rondon, bairro Aparecida (Figura 6)

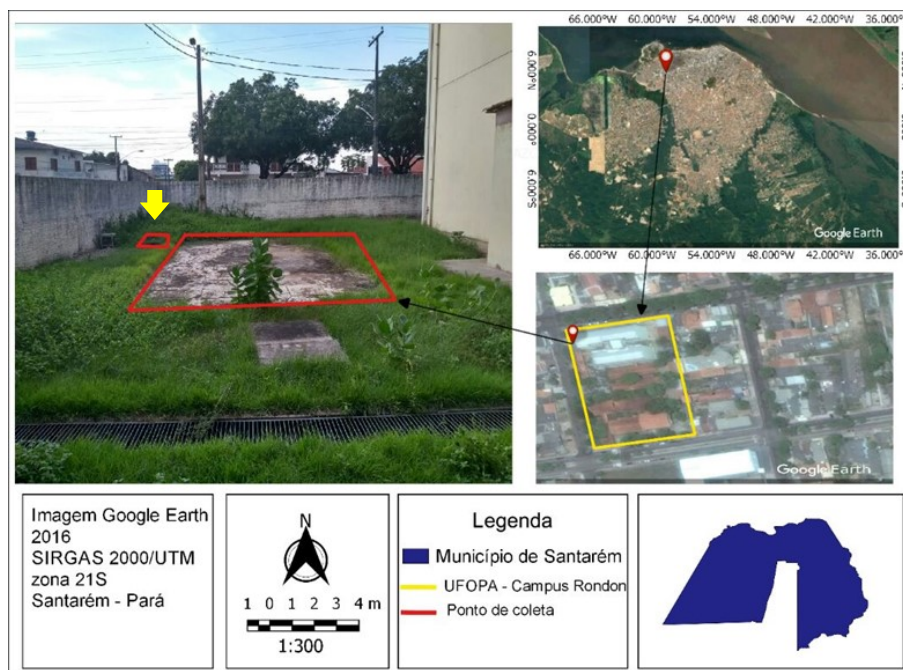


Figura 6: Mapa de localização e situação da ETE-UFOPA

A mesma contempla em seu processo operacional: Pré-Tratamento, Tratamento Primário, Tratamento Secundário e Tratamento Terciário, representados na figura 7.

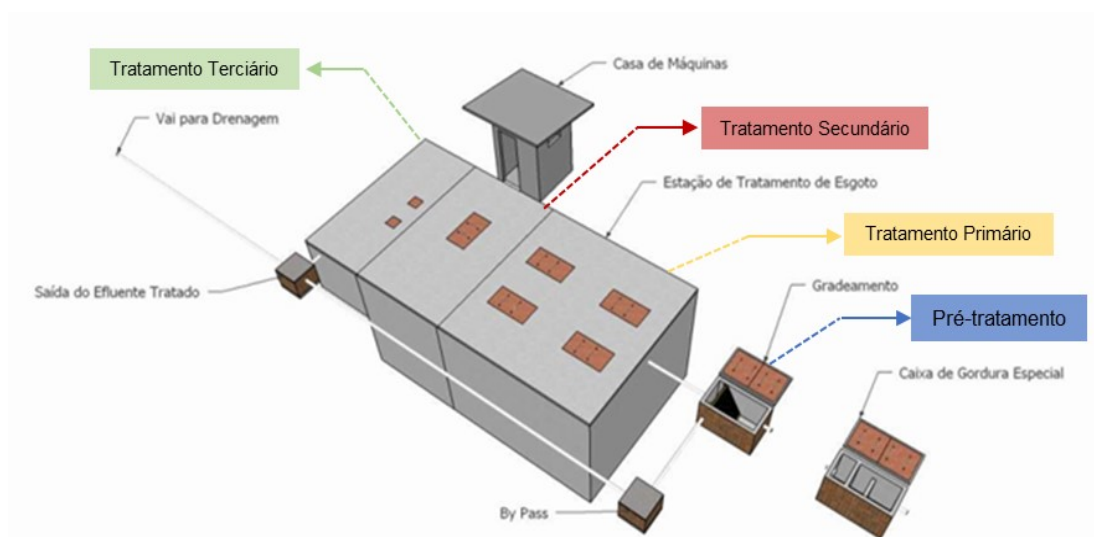


Figura 7: Projeto da estação de tratamento de esgoto. Fonte: SINFRA-UFOPA, 2012.

O pré-tratamento é constituído por uma caixa com gradeamento, tipo manual, com barras de seção retangular, barras de 6,0mm x 40,00 mm, com inclinação de 45° a 60° com a horizontal. Empregado para remoção de partículas sólidas, restos de embalagens e material considerado grosseiro proveniente de bacias sanitárias.

O tratamento primário consiste na passagem do efluente por uma unidade de sedimentação para remover os sólidos sedimentáveis, digestão anaeróbia e remoção de óleos e graxas.

O tratamento secundário aplicado é o filtro aerado tipo lodos ativados. Trata - se da remoção de matéria orgânica biodegradável contida nos sólidos dissolvidos, ou finamente particulados e, eventualmente, de nutrientes (nitrogênio e fósforo), através de processos biológicos aeróbios.

O tratamento terciário tem por finalidade a remoção de matéria orgânica complementar e de compostos não biodegradáveis. Na ETE em estudo, foi escolhido o contato com cloro, como tratamento terciário, por ser eficaz para eliminar microrganismos, como bactérias. Após o tratamento terciário, o efluente é despejado na drenagem de águas pluviais.

A coleta na ETE foi realizada na caixa de passagem, na saída do efluente tratado, utilizando uma bomba peristáltica, para recalcar o efluente e armazená-lo em 4 bombonas de 20L. Após a coleta foram transportadas para o local do experimento.

4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental foi constituído em blocos, com três repetições distribuídos em dois tratamentos casualizados com duas repetições por bloco, sorteadas ao acaso quanto a localização em cada bloco, totalizando 6 repetições por tratamento, sendo estes, efluente e água de abastecimento, como prova branca, dispostos em um sistema hidropônico em 4 unidades de tubos de PVC de 75 mm de diâmetro, 1,20 m de comprimento e capacidade de aproximadamente 5 L cada, com 10 perfurações para alocação das macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes*, esquematizado na figura 8.

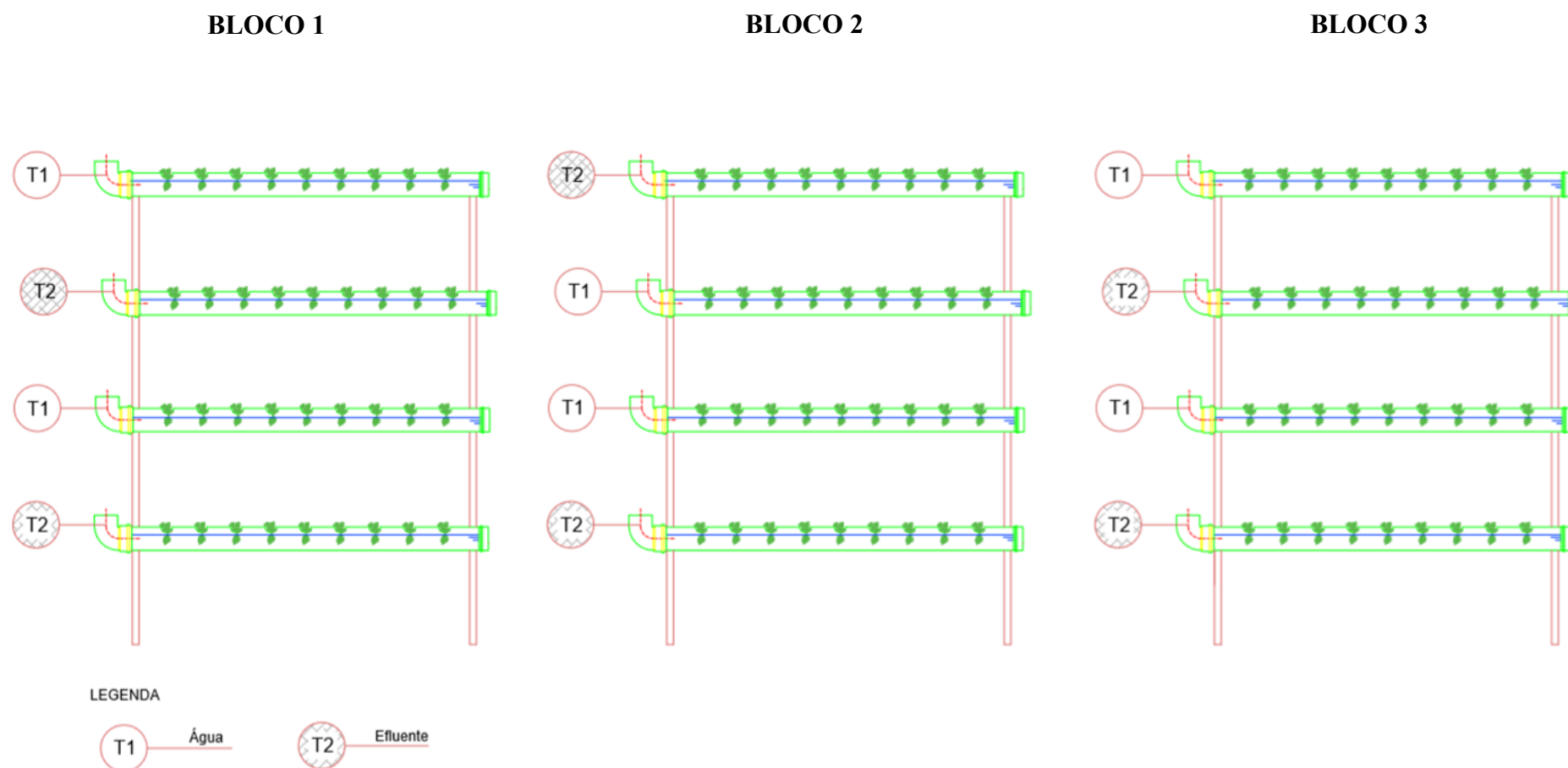


Figura 8: Sistema hidropônico constituído por macrófitas aquáticas com dois tratamentos casualizados.

Os sistemas foram instalados em uma área onde apresentava mais incidência solar durante o dia, para maior exposição das plantas a luminosidade e garantir assim atividade fotossintetizante das mesmas (Figura 9).

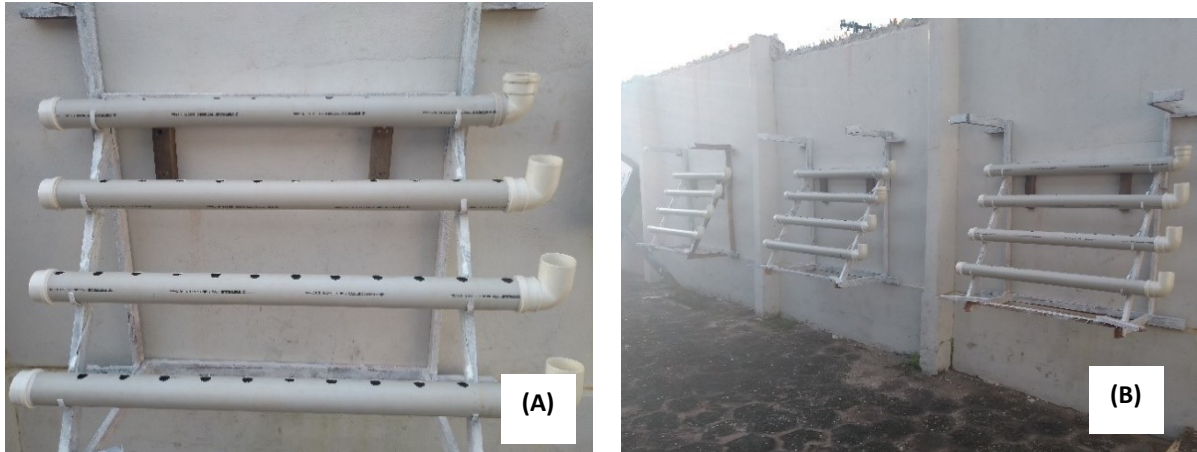


Figura 9: (A) Instalação do sistema (B) Ambiente onde o sistema foi instalado.

Após a montagem do sistema, as macrófitas coletadas foram selecionadas e caracterizadas como plantas jovens, com sistema radicular formado, apresentando folhas com aparência uniforme e verdes, alternadas em pequenas (com peso médio de 6g e com 2 a 3 folhas) e medianas (com peso médio de 15g e com 3 a 6). Antes do início do experimento, permaneceram um período de sete dias, tempo destinado à adaptação das plantas ao seu novo ambiente de desenvolvimento, contendo apenas água potável (figura 10). Para não haver influência da chuva como entrada de água, o que provocaria a diluição do efluente, foram dispostas lonas plásticas transparentes no sistema, com o objetivo de manter o sistema fechado para essa variável ambiental.



Figura 10: (A) Macrófitas jovens dispostas de forma alternada no sistema. (B) Macrófitas no período de adaptação no sistema.

4.5 ANÁLISES DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICO DOS EFLUENTES

Para o desenvolvimento do experimento foram realizadas análises físico-químicas de: pH, temperatura, DQO (Demanda Química de Oxigênio), fósforo total, fosfato, amônia, nitrito e nitrato em duas amostragens com período de detenção hidráulica de sete dias. Os parâmetros foram analisados antes e após o processo de fitorremediação, de acordo com a metodologia do *Standard Methods* (ALPHA, 2005), apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros físico-químicos avaliados durante o experimento.

PARÂMETROS	UNIDADE	MÉTODO/CÓDIGO STANDARD METHODS(2012)	EQUIPAMENTO
ph	-	in situ potenciometria (Cód.: 4500-H B)	ph metro digital
Temperatura	°C	-	Termômetro digital
DQO	mg.L ⁻¹	Oxidação (Cód. 5220 D)	Espectrofotômetro
Fosforo total	mg.L ⁻¹	Redução com Ácido Ascórbico (Cód. 4500 – P A)	Espectrofotômetro
Fosfato	mg.L ⁻¹	Ácido Vanadomolibdofosfórico (Cód. 4500 – P C)	Espectrofotômetro
Amônia	mg.L ⁻¹	N- (1- naftyl) etilenodiamina (Cód.: 4500 NO ₃ ⁻)	Espectrofotômetro
Nitrato	mg.L ⁻¹	N- (1- naftyl) etilenodiamina (Cód.: 4500 NO ₃ ⁻)	Espectrofotômetro
Nitrito	mg.L ⁻¹	N- (1-naftyl) etilenodiamina (Cód.: 4500 NO ₃ ⁻)	Espectrofotômetro

As análises de pH e temperatura, da água de abastecimento e do efluente no sistema, foram feitas “*in loco*”, com uso de um ph metro digital portátil modelo K39 0014PA Kasvi, três vezes semanais durante o experimento, pela manhã no horário das 8:30 h (figura 11).



(A)



(B)

Figura 11: (A) Coleta para análise de pH Fig. (B) Análise de pH e temperatura do efluente e da água de abastecimento usados no sistema.

As amostragens dos tratamentos foram realizadas semanalmente após a instalação do experimento, sendo coletadas durante duas semanas, uma amostra composta de efluente por bloco, totalizando 3 amostras semanais para análises em laboratório. Também foram coletadas amostras do efluente da estação de tratamento de esgoto da UFOPA para a análise do afluente do sistema constituído por macrófitas.

O procedimento usado na coleta das amostras compostas foi realizado, com o auxílio de uma seringa de 100 mL com adaptação de uma mangueira no bico, em cinco pontos diferentes ao longo de cada tubo e após armazenadas em garrafas plásticas para o transporte até o laboratório, conforme representados na figura 12.

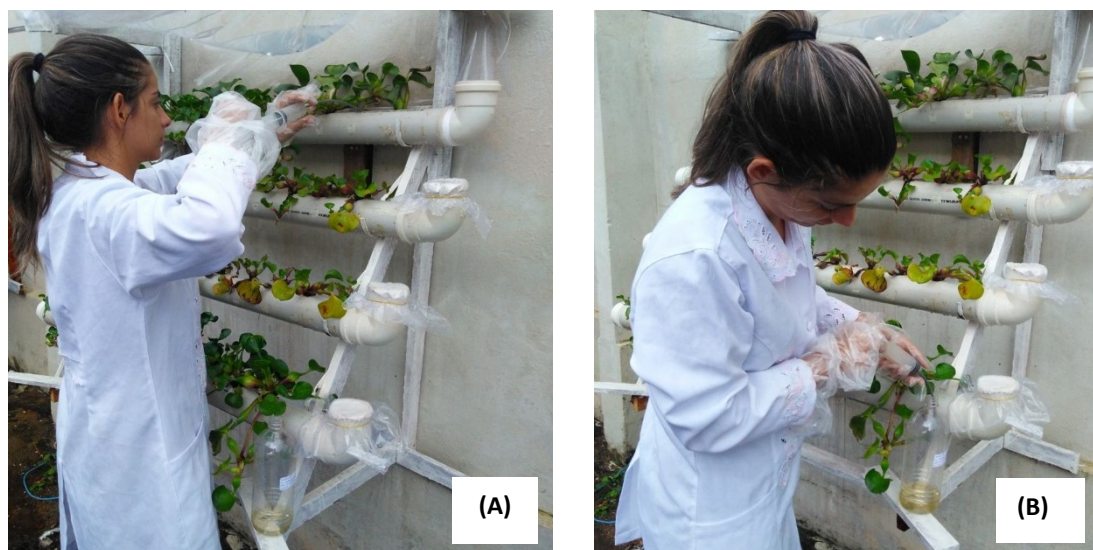


Figura 12: (A) Coleta das amostras compostas (B) Armazenamento das amostras

Essas amostras foram encaminhadas para Laboratório Biologia Ambiental, onde os parâmetros: DQO, fósforo total, fosfato, amônia, nitrito e nitrato, foram analisados em leitura de espectrofotômetro digital modelo SP 22 – Bioespectro, os procedimentos de análise foram adotados nas duas amostragens realizadas e no efluente inicial coletado na ETE-UFOPA.

4.6 ANÁLISES DE BIOMASSA E CONDIÇÕES AMBIENTAIS

a) Biomassa

Na avaliação de crescimento da biomassa, foi adotado o método não excludente: não destrutivo, abordados por Pompêo e Moschini-Carlos (2003), que consiste na marcação e

estudo periódico do crescimento da planta viva, mediante a análise de variáveis biométricas como altura, diâmetro, peso fresco, relacionada ao seu desenvolvimento.

O crescimento da biomassa das macrófitas foi analisado semanalmente ao longo de todo o período experimental, avaliando o número de folhas e seu respectivo estado de desenvolvimento, bem como a altura e o diâmetro da parte aérea da planta. Já a raiz foi realizada a medição em dois eixos X e Y, perfazendo uma média das duas medidas (em cm) utilizando um paquímetro. O número de folhas foi contado na totalidade durante o procedimento experimental. A altura da parte aérea da planta foi medida com um paquímetro começando na base do caule até à última extremidade foliar e o diâmetro medido na junção de todos os estolões ao nível da base do caule. Em seguida, foi calculada a taxa de crescimento (TC, em mm.d⁻¹) segundo a equação 1, de forma semelhante ao que foi descrito em estudos de Wong et al, (2015) e Cassoni et al., (2017).

$$TC = \frac{Ln(Af) - Ln(Ai)}{t_2 - t_1} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: TC = taxa de crescimento (cm d⁻¹); Af = altura final (cm); Ai = altura inicial (cm); t2 = tempo final (dias); t1 = tempo inicial (dias).

Para a medição dos parâmetros de desenvolvimento e aplicação da taxa de crescimento das macrófitas, foram utilizadas 3 plantas por coluna horizontal de cada bloco, sendo selecionada em tamanhos diferentes (grande, média e pequena), totalizando 36 plantas avaliadas como unidade amostral de 120 plantas.

b) Temperatura e umidade do ar

A temperatura e umidade do ar foram monitoradas durante o período experimental com intervalo de 15 min para a integração por um sensor modelo U10-003 HOB0, o mesmo foi instalado do interior de um abrigo agrometeorológico e disposto no ambiente onde encontrava-se o experimento, assim sendo foram identificados nos gráficos os valores diários correspondentes a temperaturas médias, máximas e mínimas, vale destacar que considerou-se os dias correspondentes ao período experimental para manter a escala temporal durante o período estudado. Após o período de execução do experimento o sensor foi desinstalado para assim coletar os dados com auxílio do Software Hobo Lite 2.7 e exporta-los para Microsoft® Office Excel (2016), para os cálculos temperatura e umidade média, valores máximos e mínimos e amplitude térmica diária.

c) Termografia

Para avaliar as respostas térmicas e hídricas da superfície foliar das macrófitas, foi utilizado uma câmera termográfica modelo A320, que registra energia na faixa do infravermelho termal e possibilita a obtenção de dados referentes aos padrões de distribuição de calor nos alvos desejados, com o objetivo de analisar a influência da temperatura na atividade fotossintetizante da planta. Foram realizadas quatro amostragens termográficas no decorrer do experimento, sendo a primeira no início do período de sete dias para adaptação da planta em seu novo ambiente, a segunda quando colocado o efluente no sistema e as demais amostragens foram realizadas ao final de cada coleta de efluente. Todas as amostragens tiveram um período de sete dias para repetição (Figura 13).

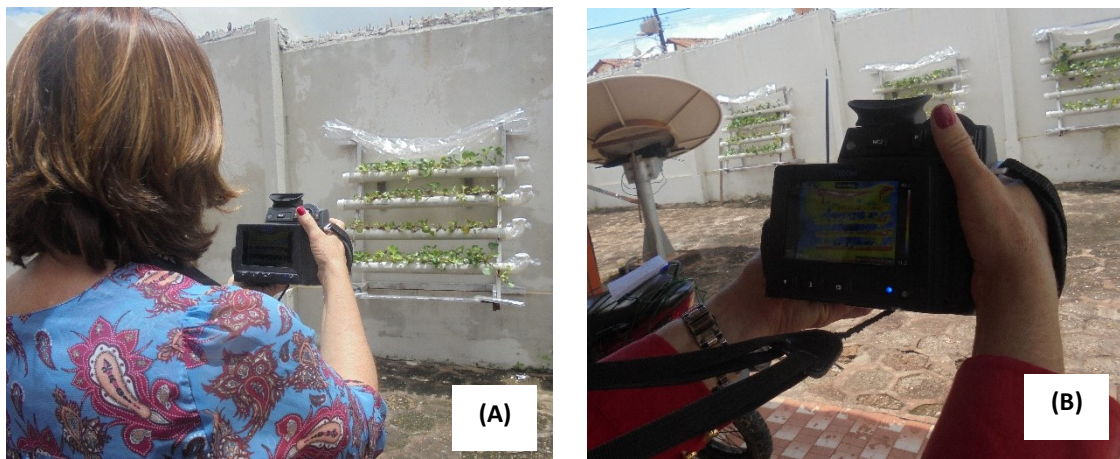


Figura 13: (A) Realização de amostragens termográfica durante o período experimental. (B) Câmera termográfica.

Os termogramas foram analisados utilizando-se o programa computacional Flir Tools 2.1®-E40, coletando-se as amostras térmicas de diferentes alvos (Figura 14).

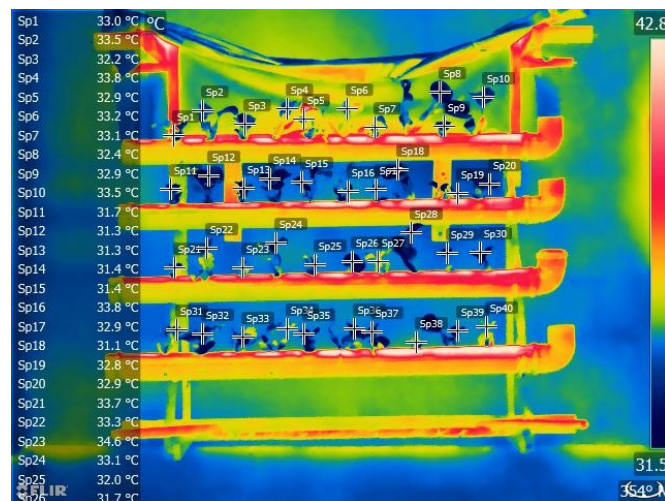


Figura 14: Imagem termográfica tratada.

As medições de temperatura foram exportadas para Microsoft® Office Excel (2016), onde foram calculados a Temperatura média, amplitude térmica e valores máximos e mínimos da superfície foliar e do ambiente onde encontrava-se instalado o sistema.

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS

Para os dados de pH foram elaborados gráficos *Box plot* no software de análise de dados científicos, Past (Paleontological Statistical) e depois plotados Microsoft® Office Excel (2016), com o objetivo de analisar a relação à posição, dispersão e distribuição dos dados.

Para analisar a eficiência de remoção dos tratamentos, os resultados foram submetidos a avaliação na equação (2), proposta por Almeida e Almeida (2005). Após o cálculo de eficiência da remoção de nutrientes foram elaborados gráficos com o intuito de representar os resultados alcançados no estudo.

$$E(\%) = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

em que: E (%): Eficiência percentual; C_e : Concentração de entrada e C_s : Concentração de saída

As análises dos dados do delineamento em blocos casualizados, relativos a biomassa, foram submetidos a análises de variância (ANOVA) e Regressão, utilizando o software *Sirvas: a computer Statistical analysis*, plotadas em gráficos para a melhor representação dos resultados. Já nas condições ambientais foram realizadas análises estatísticas de Média, Máxima e Mínima para a elaboração dos gráficos de temperatura e umidade relativa do ar, bem como as análises termográficas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estão aqui apresentados os resultados e comportamentos dos principais parâmetros físicos e químicos durante o experimento para a água e efluente utilizados no experimento: pH, DQO, fósforo total, fosfato, nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito. Bem como análises do desenvolvimento de biomassa e condições ambientais.

5.1 AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE NUTRIENTES DE EFLUENTES

5.1.1 Potencial hidrogeniônico – pH

Na figura 14 estão apresentados os resultados obtidos do pH da água e do efluente durante as duas amostragens de monitoramento do experimento.

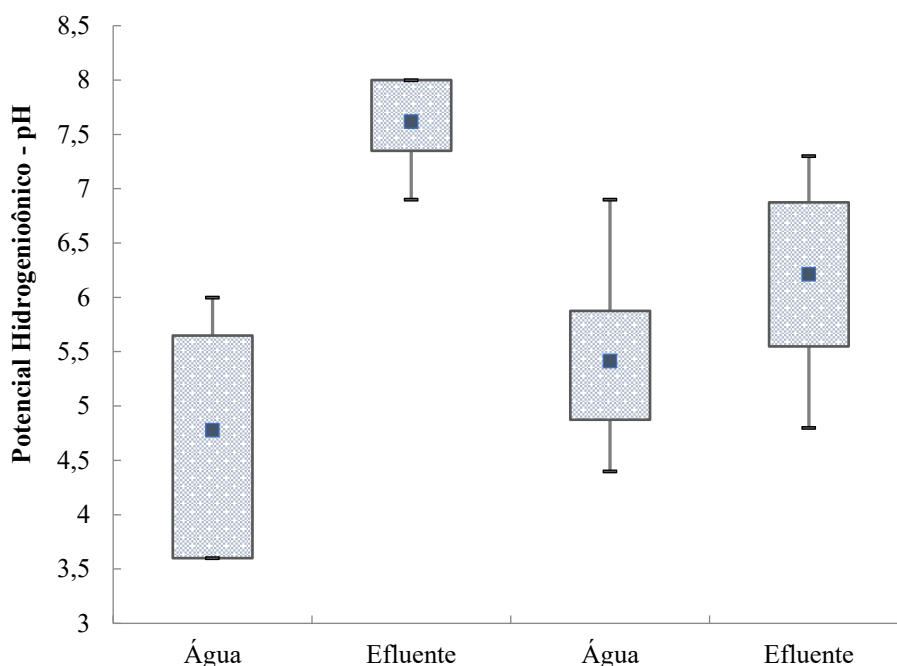


Figura 15: Comportamento do pH da água e do efluente no sistema nas duas semanas de amostragem.

Observa-se que os valores da água de abastecimento disposto no sistema, durante a primeira amostragem, variam 3,6 a 6 unidade de pH, a qual é considerada inicialmente ácida. Já as concentrações no efluente variaram de 8 a 6,9 apresentando-se numa faixa de pH mais próxima do básico. Na segunda semana de amostragem os valores na água variaram de 4,4 a 6,9 unidades de pH, apresentando menor dispersão se comparado com a primeira semana de

amostragem. Os valores de efluente variaram entre 8 e 6,9 e na segunda semana 7,3 e 4,8 unidades de pH. O blox plot apresentado indica assimetria negativa prevalecendo a concentração dos pH ácido no primeiro quartil (Q1), por outro lado na segunda semana de amostragem com maior tempo de permanência das macrófitas no sistema experimental tal parâmetro apresentou distribuição semelhante tanto no Q1 e Q2 nas análises para a água. Os valores para efluentes apresentaram-se mais simétrico nas duas amostragens, no entanto com maior variabilidade de pH.

Granato (1995), discorre que o aguapé quando em contato com soluções alcalinas possui a capacidade de diminuir o pH dessas soluções. O pH inicial do efluente coletado para o experimento apresentou-se básico (8,0) na entrada do efluente no sistema e após a entrada, variou para pH abaixo de (7.0). Estas reduções do pH também foram observadas por Freitas (2010), em efluentes de piscicultura tratados pela mesma espécie, que apresentava um pH levemente alcalino, mas que por ação de processos biológicos, se tornaram levemente ácidos, apresentando padrões semelhantes ao efluente tratado no sistema em estudo.

Durante o experimento as macrófitas no tratamento água de abastecimento público apresentaram menor desenvolvimento. A produção de biomassa da espécie nesse meio é reduzida, devido à ausência ou baixas concentrações de nutrientes se comparada com as que estavam dispostas em efluentes, promovendo assim maior decomposição dos tecidos o que segundo Weirich (2009), aumenta a microbiota da água e conseqüentemente o pH, que antes apresentava-se ácido (3,6) e variou para próximo de neutro. Este, segundo Esteves (2011), é explicado por regular muitos fenômenos químicos e biológicos em ambientes aquáticos.

Quanto ao padrão de lançamento de efluentes em corpos receptores a Resolução CONAMA nº 430/11 estabelece que o pH do efluente a ser lançado em um corpo hídrico deve estar entre 5 e 9, sendo assim, o efluente tratado por fitorremediação utilizando a macrófita da espécie *E. crassipes* encontra-se dentro do exigido pela legislação ambiental vigente.

5.1.2 DQO (Demanda Química de Oxigênio)

Para DQO no efluente inicial de entrada no sistema, não foi possível a detecção da concentração pelo equipamento utilizado nas análises de laboratório, assim como nos blocos de repetição 2 e 3, apresentando apenas um leve aumento no bloco 1 da primeira amostragem, já na segunda amostragem em todos os blocos houve aumento, como o apresentado na tabela 2.

Tabela 2: Concentrações de DQO durante o experimento

Parâmetro	Inicial (Efluente Bruto)	1ª amostragem			2ª amostragem		
		Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
DQO (mg.L ⁻¹)	≤ 0*	2,6	≤ 0*	≤ 0*	1,34	3,85	5,1

*Abaixo do nível de detecção do aparelho: DQO ≥ 1 mg.L⁻¹

Esse aumento de acordo com Souza et al., (2004), se deve a concentração de matéria orgânica no efluente. Na segunda semana de amostragem percebeu-se que devido ao crescimento acelerado da *E. crassipes*, por brotamento lateral de estolões, a mesma se desenvolveu na parte interna do tubo de PVC onde estava disposto o efluente, devido à ausência de incidência solar no interior do tubo, provavelmente essas estruturas não conseguiram realizar as atividades fotossintetizantes como as que estavam expostas as variáveis ambientais, provocando assim a decomposição do tecido vegetal e por vez aumentando a concentração de matéria orgânica no sistema e consequentemente a DQO. A partir da análise desse parâmetro no experimento, ressalta-se a necessidade do manejo da espécie, quando implementada em sistemas de tratamento de esgoto.

5.1.3 Fósforo Total e Fosfato

A eficiência média de remoção do Fósforo Total (PT) e fosfato do efluente nos três blocos casualizados, das duas amostragens durante o período do experimento no sistema constituído por macrófitas (Figura 15).

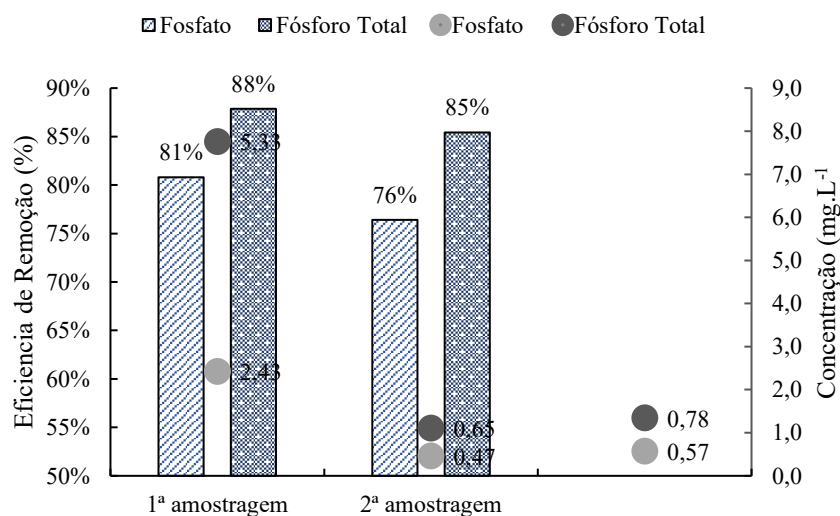


Figura 16: Eficiência média na remoção de fósforo total e fosfato.

As concentrações iniciais do efluente para fosfato $0,53 \text{ mg.L}^{-1}$ e fósforo total $5,33 \text{ mg.L}^{-1}$.¹ Apresentando uma eficiência de remoção de fosfato do efluente nos três blocos casualizados foi de 81% na primeira amostragem e 76% na segunda amostragem. Tais resultados corroboraram com os de Romitelli (1983) que alcançou valores de eficiência com a mesma espécie próximos a 85% em regime semicontínuo e 95% em regime contínuo e demonstrou manter-se nesses níveis desde que se efetuasse a remoção semanal das plantas.

As remoções de fósforo total observadas no sistema constituído pela *E. crassipes* foram similares as encontradas por Henry-Silva e Camargo (2006) que obtiveram uma remoção significativa de 82% e superiores as alcançadas por Mees (2009), cujas remoções médias e máximas foram de 11 e 38% de PT.

5.1.4 Amônia, Nitrito e Nitrato

A concentração inicial do nitrogênio amoniacal total foi de 44 mg.L^{-1} que encontrava-se fora do padrão de qualidade para lançamento de efluente segundo a Resolução CONAMA nº 430/11 que estabelece 20 mg.L^{-1} . No entanto, o uso de macrófitas na remoção apresentou eficiência na remoção significativa nas duas amostragens durante o experimento (Figura 17).

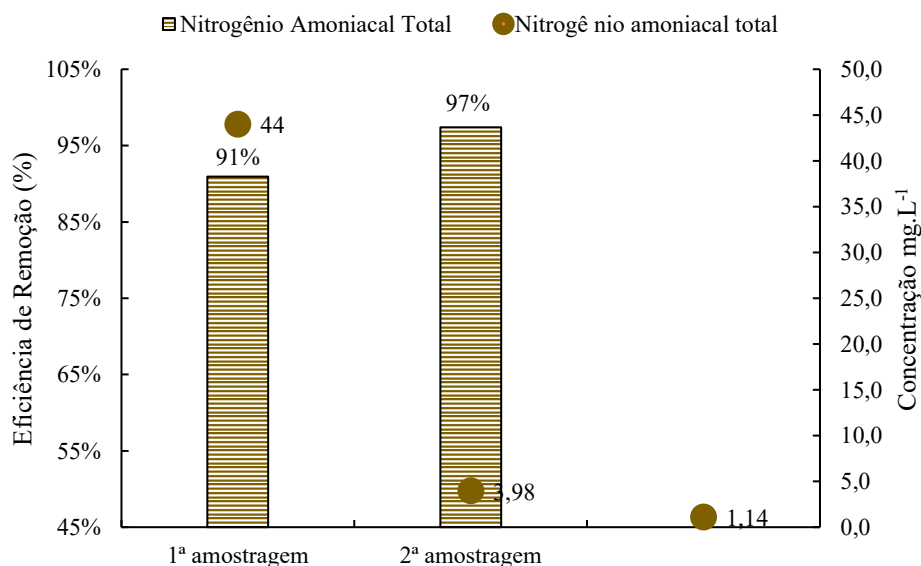


Figura 17: Eficiência média da remoção de nitrogênio amoniacal total.

Ao analisar os resultados obtidos nos experimentos com a *E. crassipes*, observou-se uma alta eficiência na remoção de Nitrogênio Amoniacal Total, nos efluentes provenientes da

ETE UFOPA. Segundo Henry-Silva e Camargo (2008), ao analisar efluentes de carciniculturas, a *Eichhornia crassipes* havia também apresentado excelentes resultados tratamentos deste efluentes. Corroborando com Mees et al., (2009) que analisaram seu uso em sistema de tratamento de abatedouro e frigorífico, obtendo dentro deste sistema uma eficiência máxima de remoção de até 47,5% e Greco (2010) que obteve a remoção de nitrogênio amoniacal total de 87% ao fazer o uso desta como fitorremediadora, em efluentes de uma estação de tratamento de esgoto.

As relações entre nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito são específicas, e sob condições aeróbias, o nitrogênio amoniacal é oxidado a nitrito e a nitrato pela ação de decompositores aeróbios (MIRANDA-SANTOS et. al., 2009), portanto, observa-se na figura 18 a redução das concentrações de $N-NH_3$ e o aumento do nitrato e nitrito.

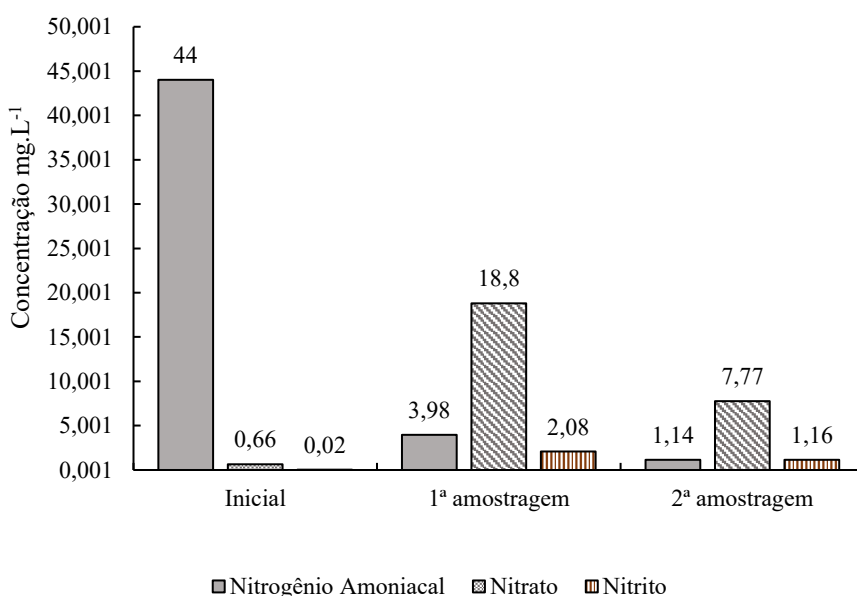


Figura 18: Concentração de nutrientes nitrogenados durante o experimento

Pode-se observar no gráfico que conforme a redução do nitrogênio amoniacal total, houve aumento de nitrito e principalmente nitrato, corroborando como o abordado por Miranda-Santos (2012), que tal sistema, constituído por macrófitas, está proporcionando a nitrificação da matéria nitrogenada e sugere o efluente adequado para utilização em fertirrigação.

Outra abordagem para esse processo de redução com a fitorremediação da *E. crassipes* foi descrita por Alves (2003), no qual, as duas formas de nitrogênio geralmente utilizadas pelas plantas são a amônia e o nitrato, porém, a amônia, por ser mais reduzida energeticamente do que o nitrato, torna-se fonte preferencial. Contudo, em ambientes onde o nitrato é predominante

ele será, então, a maior fonte de nitrogênio passível de assimilação, garantindo assim a remoção desses nutrientes, explicando, portanto, a redução do nitrogênio amoniacal inicial e a redução do nitrato na segunda amostragem de 18 mg.L^{-1} para $7,77 \text{ mg.L}^{-1}$.

5.2 ANÁLISE DE BIOMASSA E CONDIÇÕES AMBIENTAIS

5.2.1 Desenvolvimento de Biomassa

A interpretação dos resultados obtidos pela análise variância e regressão mostrou alteração das variáveis analisadas ao longo do experimento nos tratamentos de água e efluente, sendo que o ultimo apresentou valores significativos em todos os parâmetros avaliados em relação ao tratamento com o uso de água, como testemunha. Tais parâmetros, Peso, Parte Aérea, Raiz e Número de Folhas, são representados nas figuras dos gráficos a seguir.

a) Massa da Matéria Fresca

A biomassa da planta é uma variável importante para a análise de crescimento da macrófita. O comportamento do ganho de biomassa na variável massa fresca é explicado por uma reta apresentada no gráfico da figura 19.

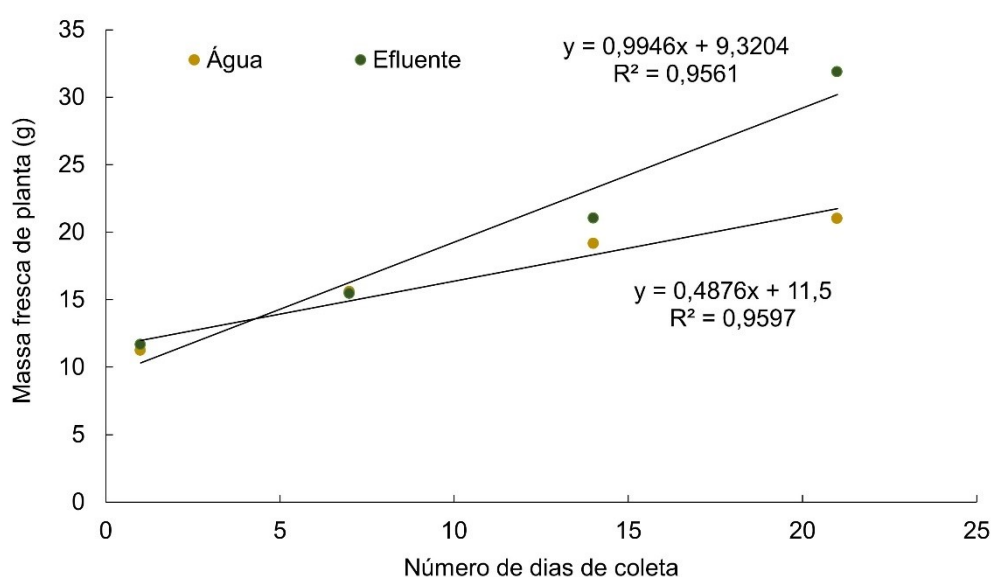


Figura 19: Massa fresca das macrófitas durante o experimento nos dois tratamentos.

O desempenho do ganho de biomassa expresso em massa apresentou-se elevado no tratamento com uso de efluente, mostrando que o meio possibilitou o possível ganho de biomassa por meio da maior disponibilidade de nutrientes, e influência das condições ambientais dispostas para os ambos tratamentos. Esses resultados corroboraram com os alcançados por Freitas (2010), na remoção de nutrientes de efluentes de piscicultura com 132,8% no ganho de biomassa, que comprovam o abordado por Thomaz e Esteves (2011), que a espécie apresenta tempos de duplicação de biomassa entre 3 e 5 dias, uma vez que o ganho de biomassa se apresentou expressivo em um curto período e condições favoráveis de desenvolvimento (Figura 20)

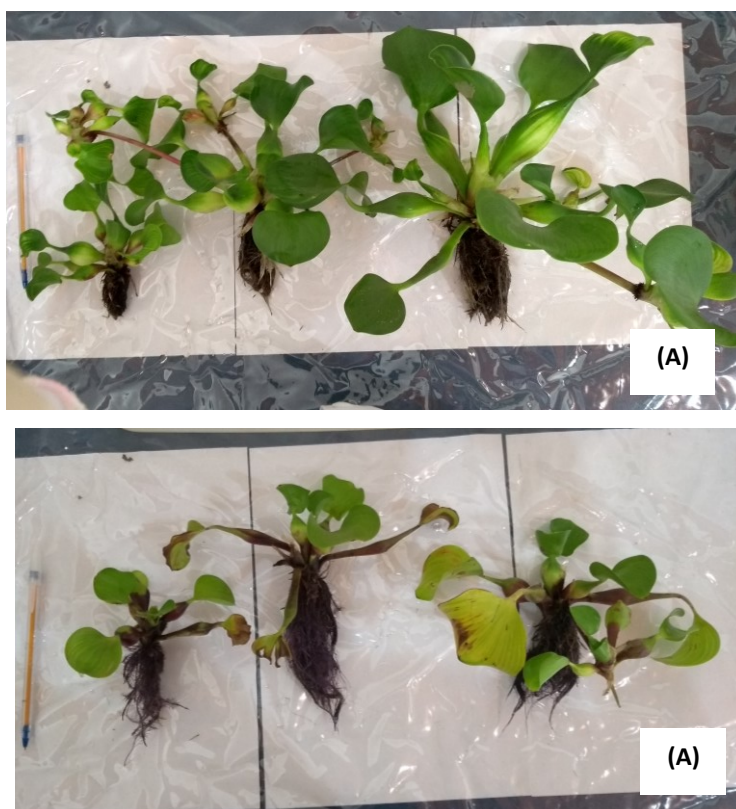


Figura 20: Desenvolvimento de biomassa fresca (A) Tratamento no efluente (B) Tratamento na água.

Parte Aérea

Quanto ao desenvolvimento da parte aérea, são apresentados tais resultados durante o experimento (Figura 20).

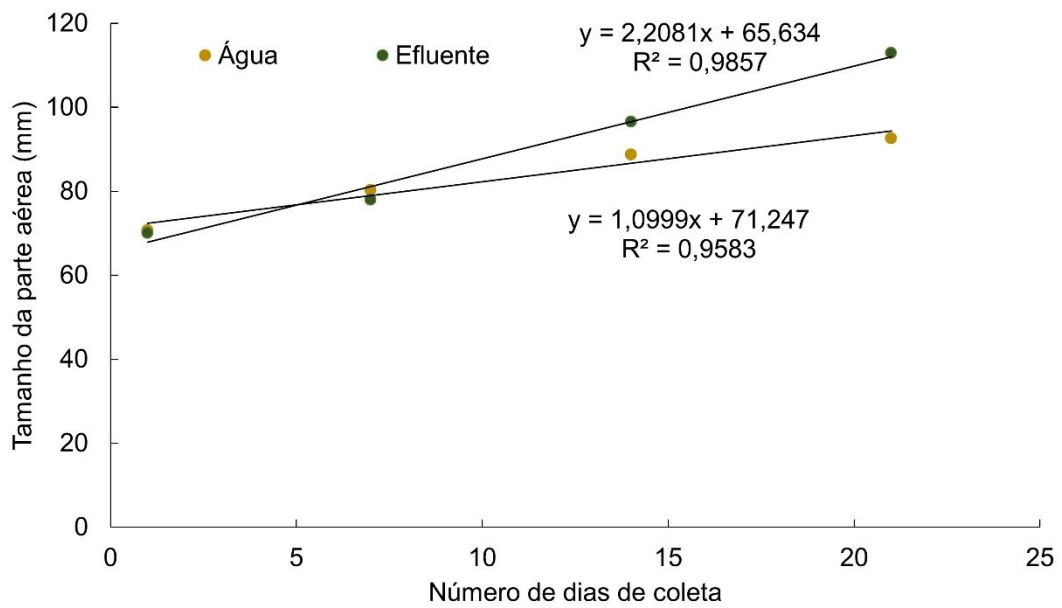


Figura 21: Tamanho da parte aérea nos dois tratamentos.

A parte aérea da planta, corresponde as estruturas de caule e área foliar da planta, estes apresentam-se expressivo no ganho de biomassa, uma vez que representa a parte estrutura anatômica de maior contribuição, por tanto uma variável importante na análise de crescimento da macrófita (Figura 22).



Figura 22: Desenvolvimento da área foliar nos diferentes tratamentos nas colunas horizontais.

b) Raiz

O desenvolvimento do tamanho de raiz apresentou o comportamento diferente das outras variáveis de biomassa (Figura 23)

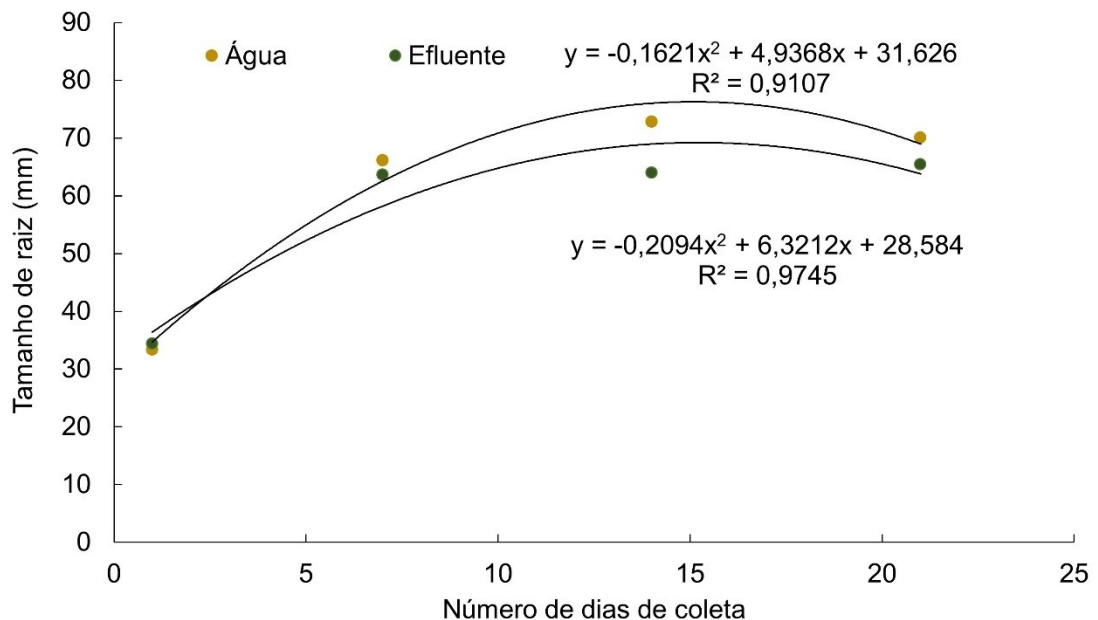


Figura 24: Tamanho da raiz nos dois tratamentos.

Pode-se observar que o crescimento de raiz no tratamento contendo água foi mais acentuado quando comparado com o tratamento o efluente, essa diferença deve-se ao investimento em raiz para procura por nutrientes que apresentavam-se em baixas concentrações. O desenvolvimento de raiz foi menor para o tratamento 2 o que evidencia que as macrófitas que estavam no efluente investiram mais em parte aérea com estruturas fotossintéticas ativas e menor desenvolvimento em raiz, devido as alta disponibilidade de nutrientes. Para os dois tratamentos observou-se no último ponto o período de senescência da raiz.





Figura 25: Desenvolvimento de raiz durante duas medições (A) Segunda medição (B) Terceira medição.

c) Número de Folhas

Foi identificado o ganho de folhas durante as contabilizações semanal ao longo do experimento, mostrando resultados significativos nos dois tratamentos, com desenvolvimento expressivo para o tratamento com efluente, adotado para o processo de fitorremediação (Figura, 22)

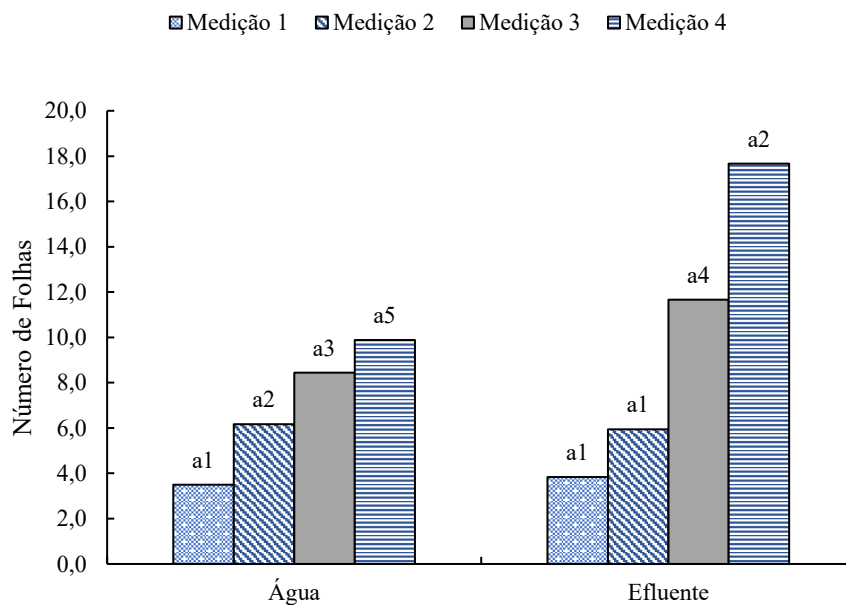


Figura 26: Número de folhas nos dois tratamentos.

5.2.2 Condições Ambientais

a) Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura média do ar durante o experimento apresentou os valores de $28,1^{\circ}\text{C} \pm 1,5$, e umidade média relativa do ar foi de 85,9%. Na figura 23, pode-se analisar a variação diária da temperatura e umidade relativa do ar durante o período de 14 de março a 02 de abril, em que o experimento foi realizado.

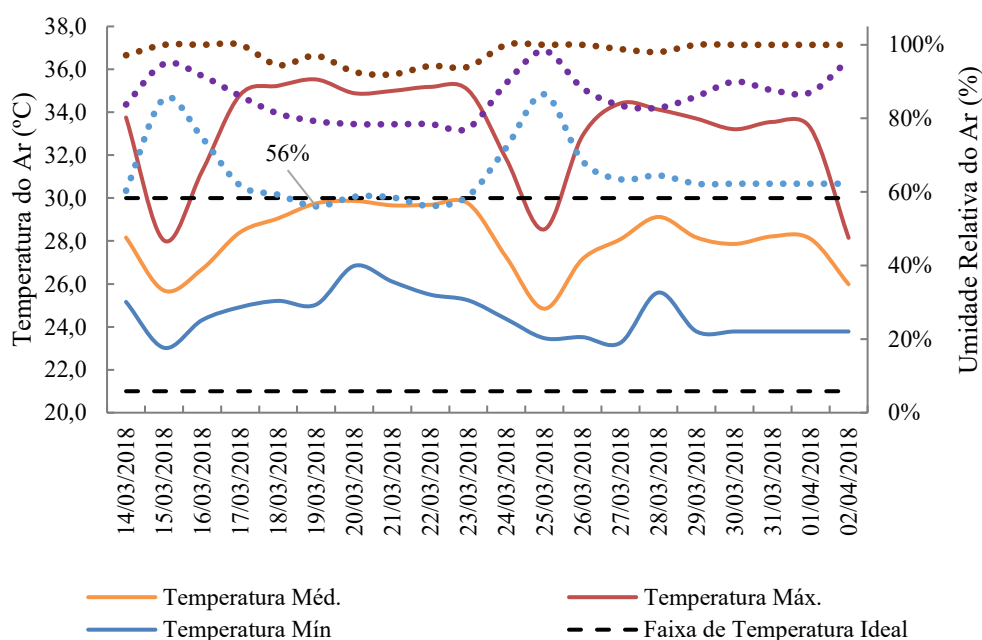


Figura 27: Gráfico de temperatura média máxima e mínima do ar.

As maiores temperaturas máximas diárias foram registradas nos dias 17, 18 e 19 de março, sendo respectivamente 34,8; 35,2 e 35,5 °C. Enquanto as temperaturas mínimas absolutas ocorreram nos dias 2º e 14º com 23º e 23,3 respectivamente. De acordo com Kawai e Grieco (1983), para se obter o crescimento máximo das plantas as temperaturas ótimas deverão estar na faixa de 21°C a 30°C. Perazza et al. (1985) recomenda como temperatura ideal está na faixa de 20°C a 30°C.

A umidade relativa do ar, durante o período do experimento apresentou variações em função da temperatura do ar que modifica a capacidade de determinado volume de ar conter vapor d'água. O menor valor observado de umidade relativa mínima foi de 56% no dia 19 de março, bem como a maior temperatura máxima de 35,5°C. Weirich (2009), não estabelece uma faixa ideal de umidade relativa, no entanto, aborda que valores próximos de 42%, encontra-se abaixo do nível adequado para o desenvolvimento vegetal e animal.

No período de 21 dias do experimento, observou-se que a temperatura média e mínima diária e umidade relativa do ar se mantiveram na faixa e nível ideal abordada nas literaturas, o que garantiu o crescimento acelerado da *E. crassipes*, em conjunto com outras variáveis ambientais e disponibilidade de nutriente descritas por Wetzel (2001) e Camargo et al. (2003), a diferença no desenvolvimento das macrófitas no sistema é demonstrado na figura 24.



Figura 28: A) Macrófitas no início do experimento. B) Desenvolvimento da macrófitas no final do experimento sob condições ambientais e disponibilidade de nutrientes.

b) Temperatura da superfície foliar (Termografia)

As análises da temperatura da superfície foliar apresentaram diferentes perfis termográficos com todas as unidades de macrófitas alocadas nos blocos de repetição, em conjunto com a temperatura média do ar (Figuras 21 e 24.). Essa variável tem por objetivo afirmar a importância da temperatura para o desenvolvimento da *E. crassipes* explanado por Mendonça, 2005; Biudes e Carmargo et al., (2008) e Weirich (2009) em seus estudos com macrófitas aquáticas em sistemas de tratamento de esgoto.

No primeiro perfil termográfico apresentado, no início do experimento é possível observar a temperatura das plantas no efluente e na água como mais homogêneas, com alguns picos de temperatura nos blocos 1 e 3, essa diferença deve-se as posições tanto dos blocos e tratamentos. Já no segundo perfil, ao final do experimento, observa-se maior diferença entre as temperaturas nos dois tratamentos essa variação de temperatura entre a água e efluente está possivelmente relacionada ao ganho de folhas das macrófitas dispostas nos efluentes e ao baixo desenvolvimento das que estavam no tratamento testemunha, e que devido a disponibilidade de nutrientes algumas encontravam-se em um período de senescência.

A análise da termografia infravermelho evidencia os padrões térmicos na superfície foliar das macrófitas, e pode expressa efeitos relacionados as taxas evapotranspiratórias da planta. Durante as trocas gasosas desencadeia ativamente o poder depurativo no efluente, quando as plantas absorvem a água do esgoto e liberam para a atmosfera vapor d'água. De acordo com Truong et al. (2008) em estações de tratamento de esgoto com plantas é possível reduzir volume do esgoto, tendo as macrófitas uma importante participação no processo de fitovolatilização.

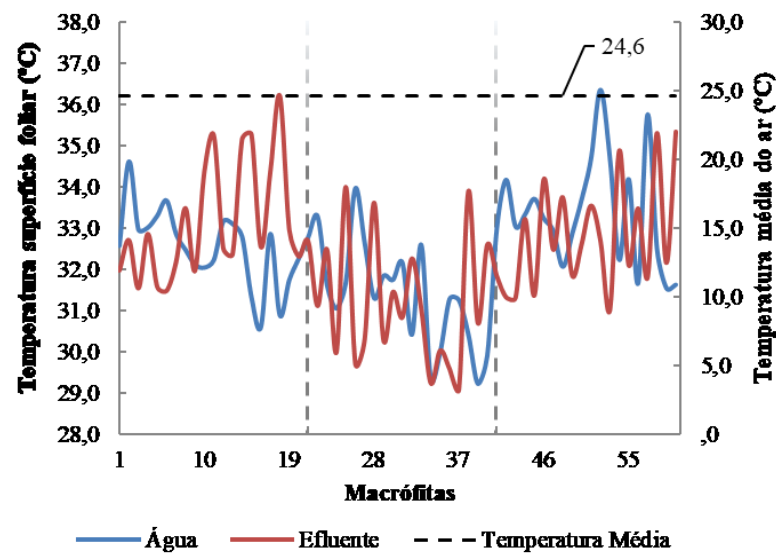


Figura 29: Perfil termográfico da superfície foliar (Inicial)

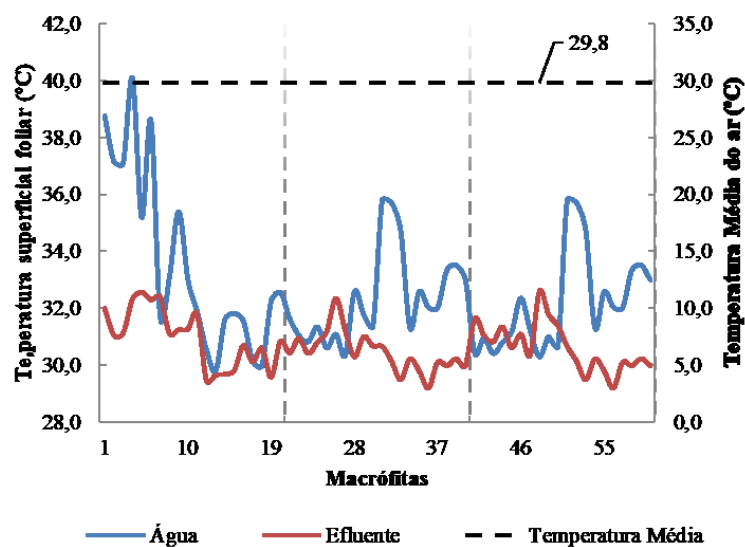


Figura 30: Perfil termográfico da superfície foliar (Final)

Conforme Ucker (2012) porcentagem de água perdida por este fator deve ser considerada, a fim de não se subestimar os resultados de eficiência do sistema, pois a redução do volume do esgoto na estação de tratamento faz com que os cálculos de eficiência, baseados apenas na concentração de determinados constituintes do esgoto, resultem em valores subestimados. Uma opção abordada por Miranda-Santos (2012), trata-se da equalização que seria medir a evapotranspiração, ou os volumes de entrada e saída do sistema, porém nenhuma das opções são frequentemente utilizados por representar altos os custos de instalação e operação. Vale destacar que a estrutura de monitoramento de fitorremediação utilizada no sistema permitiu quantificar esse volume volatilizado para a atmosfera, tais dados são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Volume de reposição dos tratamentos no sistema.

Tratamentos	1ª Semana		2ª Semana	
	V. inicial (L.d ⁻¹)	V. Reposição (L.d ⁻¹)	V. Reposição (L.d ⁻¹)	V. Reposição (L.d ⁻¹)
Água	24	11,5	11,7	6,9
Efluente	24	11,4	17,8	14,22

Observa-se que a quantidade de reposição em L.d⁻¹, de efluente na segunda semana de amostragem apresentaram-se mais elevadas em relação a água, tais valores possivelmente estão relacionados as atividades metabólicas das macrófitas, uma vez que na segunda semana as mesmas apresentavam maior desenvolvimento, o que resultaram na maior taxa de evapotranspiratórias da planta. Estes dados experimentais podem ser utilizados para estimar a equalização da evapotranspiração em sistemas de tratamento de efluente constituídos por macrófitas, e firmar a aplicabilidade da fitorremediação como um método alternativo eficiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de fitorremediação experimental com macrófitas aquáticas da Amazônia apresentou-se como uma eficiente estimativa para a implementação de unidades complementares em sistemas de tratamento de efluentes para as condições climáticas da região, a partir dos resultados obtidos:

- A macrófita aquática da espécie *Eichhornia crassipes* é eficiente na fitorremediação de nutrientes constituintes em efluente doméstico.
- A maior eficiência de remoção está para compostos nitrogenados e fosfatados
- O Aguapé que é espécie aquática típica da Amazônia deve ser manejada em sistemas de tratamento de efluentes para evitar o processo inverso quanto a remoção de matéria orgânica e translocação dos nutrientes incorporados no tecido vegetal.
- As condições ambientais na unidade experimental foram favoráveis na expressão do potencial de fitorremediação do Aguapé.
- O efluente do sistema experimental possui condicionantes nutricionais para ser utilizado como alternativa eficiente, simples e de baixo custo no reuso em cultivos fertirrigados e agroflorestais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard Methods for Examination of Water and WasteWater**. 18th. Washington, 2005.

ALBURQUERQUE, Syron W. P. **Plantas forrageiras da Amazônia - Aquáticas Flutuantes Livres**. *Revista ACTA Amazonica*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus. V 3. p 457-471, 1981.

ALMEIDA, R. de A.; ALMEIDA, N. A. M. **Remoção de coliformes do esgoto por meio de espécies vegetais**. *Revista Eletrônica de Enfermagem*, v. 07, n. 03, p. 308 - 318, 2005.

ALVES, E.; CARDOSO, L.R.; SCAVRONI J.; L.R.; FERREIRA, L.C.; BOARO, C.S.F.; CATANEO, A.C; **Avaliações fisiológicas e bioquímicas de plantas de aguapé (*Eichhornia crassipes*) cultivadas com níveis excessivos de nutrientes**. *Revista Planta Daninha*, Viçosa-MG, v.21, p.27-35, 2003.

ANDRADE, J. C. M.; TAVARES, S. R. L.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação, o uso de plantas para a melhoria ambiental**. São Paulo: Oficina de texto. p. 176, 2007.

BARROS, J. P. A. A. JIMENEZ, M. R. S. OLIVEIRA, F. R. HANARES, M. N. P. **Tratamento de esgoto doméstico com wetland povoada com *Eichhornia crassipes***. In Anais do Congresso nacional de meio ambiente –Minas Gerais, 2015.

Brasil. Resolução CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 430 de 13 maio de 2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, **n.92 de 16/05/2011** p.89. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama>

BENTO, L.; MAROTTA, H; ENRICH-PRAST, A. **O papel das Macrófitas aquáticas emersas no ciclo do fósforo em lagos rasos**. *Revista Oecol. Bras.* v. 11 (4): 582-589, 2007.

BERRY, J.; BJORKMAN, O. **Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants**. *Annual Review of Plant Physiology*. Vol. 31:491-543, 1980.

BRAGA, B.; HESPANOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPECER, M; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia sanitária e ambiental**. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.

BIUDES, J. F. V.; CARMARGO, A. F. M. **Estudo dos fatores limitantes à produção primária por macrófitas aquáticas no Brasil**. *Oecol. Bras.*, v. 12(1); 7-19, 2008.

CÂMARA, M. Y. F.; PINTO, L. E. S.; FREITAS, F. B. A.; PINTO, SANTOS, A. G. D.; Martins, D. F. F. **Determinação do Potencial Fitorremediador da *Eichhornia Crassipes* em Ambientes Naturais**. *Revista Blucher Chemistry Proceedings*. v. 2, nov. 2015.

CARDOSO, M. G. **Estudo da adsorção do íon amônio utilizando zeólitas naturais e sintetizadas a partir do rejeito do beneficiamento do carvão**. (Dissertação) UFRGS, 2016.

CASSONI, A.C.; DANKO A. S.; FIÚZA, A., BORGES, M. T. **Role of three different plants on simultaneous salt and nutrient reduction from saline synthetic wastewater in lab-scale constructed wetlands.** Science of the Total Environment, 2017

CASTRO G. M. SCHWANTES, D. GONÇALVES JUNIOR, A. C.; RICHART, A. VEIGA, T. G.; ROSENBERGER A. G. **Treatment of dairy effluents in wetlands systems with floating aquatic macrophytes.** Revista de Ciências Ambientais – RCA. Canoas, v. 11, n. 2, 2017.

CHAERLE. L.; VAN DER STRAETEN, D. **Imaging techniques and the early detection of plant stress.** Trends in plant science, 5(11), 495-501, 2000.

D'ANGELO, E. M.; REDDY, K. R. **Regulators of heterotrophic microbial potentials in wetland soils.** Soil Biology and Biochemistry. V. 31 815-830, 1998.

DIAS, F. S. Nascimento, J. P. A. Meneses, J. M. **Aplicação de macrófitas aquáticas para tratamento de efluente doméstico.** Revista Ambiental, Paraíba, v. 2, n. 1, p. 10 6 - 11 5, 2016

DINARDI, A. L.; FORMAGI, V.M.; CONEGLIAN, C.M. R.; BRITO, N.M. DE; SOBRINHO, G.D.; TONSO, S. PELEGRINI, R. **Fitorremediação.** In Anais do III Fórum de Estudos Contábeis, Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro, 2003.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos da Limnologia.** 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 826.

ESTEVES, F. A.; MENEZES, C. F. S. **Papel da água na limnologia da sociedade moderna.** In: ESTEVES, F.A. (coordenador) Fundamentos de limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 62-73. 2011.

ESTEVES, F. A.; PANOSSO, R. **Fósforo.** In: ESTEVES, F.A. (coordenador) Fundamentos de limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 259-281. 2011.

FERREIRA, I. D.; MORITA, D. M. **Biorremediação de solos contaminado por isobutanol, Bis-2-etilhexilftalato e Di-isodecilftalato.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 643-652, 2012.

FREITAS, F. V. **Biorremediação em efluentes de piscicultura utilizando macrófitas aquáticas *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) e probióticos.** Dissertação de mestrado: Campina Grande-PB, 2010.

FUNASA, Fundação Nacional da Saúde. **Arranjos tecnológicos para tratamento de esgoto sanitário de forma descentralizada.** Brasília: Funasa. p. 74, 2014.

GRANATO, M. **Utilização do aguapé no tratamento de efluentes com cianetos.** Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, p. 39, 1995.

GRECO, M. F. P. S. **Estudo exploratório de macrófitas aquáticas: potencial de fitorremediação de N-NH₃**. Dissertação (mestrado) Universidade de Santa Cruz do Sul – UniSC, RS, 2010.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. **Composição química de macrófitas aquáticas flutuantes utilizadas no tratamento de efluentes de aquicultura**. Planta Daninha, Viçosa-MG, v. 24, n. 1, p. 21-28, 2006.

HENZE, M. Harremoes, P. Cour J. Arvin, E. **Wastewater treatment: biological and chemical processes**. Springer Verlag. Second Edition. Heidelberg, 1995.

ISAAC, V. J.; CERDEIRA, R. G. P. **Avaliação e monitoramento de impacto dos acordos de pesca**. ProVárzea. Manaus, Ibama, 2004. p. 61.

JONAS, T. C.; Hussar, G. J. **Utilização do aguapé no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado**. Revista Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 4, p. 020-032, 2010.

KARCZMARCZYK, A. A. BARYŁA, A. **Cold season temperature pattern over a horizontal subsurface flow constructed wetland** – application of thermography in environmental research. Fresenius Environmental Bulletin © by PSP Volume 22 – No 12b, 2013.

KAWAI, H.; GRIECO, V.M. **Utilização do Aguapé para tratamentos de esgoto doméstico. Estabelecimento de Critérios de dimensionamento de lagoa de aguapé e abordagem de alguns problemas operacionais**. Revista DAE, v. 135, p. 79-90. 1983.

KISSMANN, K. G. GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**. São Paulo: Basf Brasileira, 1992. p. 798.

MARIANO, A. P.; ANGELIS, D. F.; BONOTTO, D. M. **Monitoramento de indicadores geoquímicos e avaliação de biodegradação em área contaminada com óleo diesel**. Engenharia Sanitária Ambiental, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 296-304, 2007.

MEES, J. B. R.; GOMES, VILAS BOAS, S. D.; M. A.; FAZOLO, A; SAMPAIO, S. C. **Removal of organic matter and nutrients from slaughterhouse wastewater by using Eichhornia crassipes and evaluation of the generated biomass composting**. Revista Eng. Agrícola, Jaboticabal, v.29, n.3, p.466-473, 2009.

MEDEIROS, R. M. L.; SABAA SRUR, A. U. O.; ROQUETTE PINTO, Carmen. L. **Estudo da biomassa de aguapé, para a produção do seu concentrado proteico**. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, v. 19, n. 2, p. 226-230, 1999.

MENDONÇA, H.V.; RIBEIRO, C. B. DE M.; BORGES, A. C.; BASTOS, R. R. **Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas**. Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science: v. 7, n. 2, 2012.

METCALF, L; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5 ed. AECOM: bookman, 2015.

MIHELICIC, J. R.; ZIMMERMAN, J. B. **Engenharia ambiental: fundamentos, sustentabilidade e projetos**. LTC, 2012.

MIRANDA-SANTOS, L. **Avaliação do desenvolvimento e da eficiência do capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) em sistemas híbridos de alagados construídos**. Dissertação (Mestrado). Bauru, 2012.

MOTA, F. S. B. VON SPERLING, M. (Coordenadores) et. al. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 428 p.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. 2ª ed. rev. Atual. e ampl. São Paulo: Blucher, 2011. 565 p.

PERAZZA, M. C. **O aguapé: meios de controle e possibilidade de utilização**. Revista DAE, São Paulo. N 125, p. 125, p. 18-24, 1985.

PEREIRA, R. G., SILVA, J. G., FILHO, J. F., PEREIRA, M. C. D. E., MELO, R. B. **Aproveitamento da biomassa residual da planta aquática *Eichhornia crassipes* em biodigestor**. In Anais do Congresso brasileiro de ciência e tecnologia em resíduos e desenvolvimento sustentável –Santa Catarina, 2000.

PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri: Manole, 2005. 842 p.

POMPÊO; MOSCHINI-CARLOS, **Macrófitas aquáticas e perifíton: aspectos ecológicos e metodológicos**. São Carlos: RiMa, 2003. p. 185.

POMPÊO, M. **Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas**. Revista Oecol. Bras., 12 (3): 406-424, 2008.

REDDY, K. R.; KADLEC, R. H.; FLAIG, E.; GALE, P. M. **Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A Review**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, b 29(1):83-146, 1999.

ROCHA, F. A. **Reuso de águas residuárias na agricultura: a experiência israelense e brasileira**. Enciclopédia Biosfera, v. 6, p 1-9, 2010.

ROMITELLI, M. S. **Remoção de fósforo em efluentes secundários com emprego de macrófitas aquáticas do gênero EICHHORNIA**. Revista DAE. v. 133, p 66-88, 1983.

SINFRA-UFOPA, Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal do Oeste do Pará. Projeto Básico: estação de tratamento de esgoto. Santarém, 2012

SOUZA, J. T.; VAN HAANDEL, A.; L IMA, E. P. C. H ENRIQUE, I. N. **Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB**. Revista Eng. Sanitária e Ambiental. Nota técnica. Vol. 9 - Nº 4 - out/dez, p. 285-290, 2004.

TAVARES, S. R. de L.. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2009.

TAVARES, S. R. de L. **Remediação de solo e água contaminados por metais pesados: conceitos básicos e fundamentais**. Rio de Janeiro, RJ: 2013. 147p.

THOMAZ, S. M.; ESTEVES, F. A. **Comunidade de macrófitas aquáticas**. In: ESTEVES, F.A. (coordenador) Fundamentos de limnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 461-518. 2011.

TRUONG, P.; VAN, T. T.; PINNERS, E. **Sistema de aplicação Vetiver: manual de referência técnica**. ed. 2. Rede Internacional de Vetiver, 2008.

UCKER, F. E. **Eficiência do capim Vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) no tratamento de esgoto sanitário**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

VON SPERLING, M. **Princípios de tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 425p, 2005.

WETZEL, R. A. **Limnology lake and river ecosystems**. California: Academic Press, California, 2001. 1006p.

WONG, J. X. W., COLEN, C. VAN, AIROLDI, L. **Nutrient levels modify saltmarsh responses to increased inundation in different soil types**. Marine Environmental Research, 104, 37–46., 2015.