

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE E APLICABILIDADE DE MACRÓFITAS  
AQUÁTICAS PARA POLIMENTO DE EFLUENTES DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO – ESTUDO EM ESCALA REAL**

**MARIO EDUARDO PARDINI AFFONSECA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU - SP  
JUNHO DE 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE E APLICABILIDADE DE MACRÓFITAS  
AQUÁTICAS PARA POLIMENTO DE EFLUENTES DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO – ESTUDO EM ESCALA REAL**

**MARIO EDUARDO PARDINI AFFONSECA**

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luiz de Oliveira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU - SP  
JUNHO DE 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

A257a Affonseca, Mario Eduardo Pardini, 1990-  
Avaliação da viabilidade e aplicabilidade de macrófitas aquáticas para polimento de efluentes de estações de tratamento de esgoto doméstico: estudo em escala real / Mario Eduardo Pardini Affonseca. - Botucatu : [s.n.], 2016  
xi, 91 f. : fots. color., ils. color., grafs. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016  
Orientador: Eduardo Luiz de Oliveira  
Inclui bibliografia

1. Macrófitas aquáticas. 2. Águas residuais - Purificação. 3. Biomassa. 4. Lagoas de estabilização. I. Oliveira, Eduardo Luiz de. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

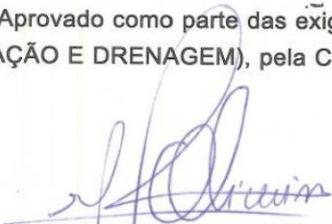
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE E APLICABILIDADE DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS PARA  
POLIMENTO DE EFLUENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTI-  
CO - ESTUDO EM ESCALA REAL**

**AUTOR: MARIO EDUARDO PARDINI AFFONSECA**

**ORIENTADOR: EDUARDO LUIZ DE OLIVEIRA**

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

  
Prof. Dr. EDUARDO LUIZ DE OLIVEIRA  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / UNESP - Faculdade de Engenharia de Bauru

  
Prof. Dr. ROBERTO LYRA VILLAS BÔAS  
Depto de Solos e Recursos Ambientais / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

  
Dra. CLAUDIA MARIA GOMES DE QUEVEDO  
Depto Diretoria de Tecnologia e Meio Ambiente / SABESP

Botucatu, 04 de julho de 2016.

**Dedico**

*À minha mãe*

*Pida, fonte de inspiração e coragem, e à minha filha Bruna, a quem quero ser exemplo de honestidade e amor ao próximo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus, meu esteio, socorro bem presente na angústia e tribulações. Tudo à Ele e para Ele!

A minha família, pela capacidade de acreditar e compreender minhas limitações e ausência.

Ao Professor e meu orientador, Dr. Eduardo Luiz de Oliveira, pela orientação, confiança, paciência, humildade, disposição e pela amizade conquistada ao longo dos últimos anos, exemplo de serenidade e respeito.

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e por tantas outrasque, de alguma forma, contribuem para a melhoria da qualidade do nosso meio ambiente e evolução tecnológica buscando o aperfeiçoamento contínuo de seus serviços e produtos.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Botucatu, Faculdade de Ciências Agronômicas, pelo auxílio para o desenvolvimento desta pesquisa e realização de um sonho de menino, ser aluno desta conceituada instituição.

Ao Professor Dr. João Carlos Cury Saad, pelo incentivo, aconselhamento e, especialmente, pelo carinho que sempre demonstrou por mim.

Ao Professor Dr. Roberto Lyra Villas Bôas, pelo apoio durante o árduo trabalho. Mestre dedicado e amigo pessoal, exemplo de honra e amizade.

Aos funcionários da Sabesp do município de Charqueada, em especial, aos encarregados Eduardo e Lineu, homens de princípio e que acreditaram neste projeto mesmo diante de tantas dificuldades operacionais enfrentadas.

As amigas Márcia Sanches Vendrami e Érika Vendrami Godinho, incentivadoras, mulheres virtuosas, que me apoiaram e acreditaram em mim, às vezes apenas um sorriso bastava para me motivar.

A nossa Gerente de Controle Sanitário, Dra. Ana Lúcia Silva, pela co-orientação neste projeto, pela amizade, desenvoltura, capacidade técnica, lealdade e amor com que se entregou a este trabalho. Sinceramente sem você não realizaria este sonho. Só nós sabemos o que quis dizer...

A todos funcionários do Controle Sanitário da Sabesp no Médio Tietê pela produção e análise de material e coletas intermináveis.

Ao meu Diretor e querido amigo, Eng.º Luiz Paulo de Almeida Neto, que nunca deixou de me desafiar, orientar e, principalmente, cobrar resultados. Este trabalho é fruto de desafio lançado no final de 2011. Inspiração para ingresso neste Mestrado.

Aos grandes amigos da minha querida Sabesp, Unidades de Negócio Capivari e Jundiaí e Médio Tietê, Maurício Tápia, Sérgio Monção, Wagner Carreira, Sandro, Cris, Antônio Carlos Teixeira, Maurício Polezi, André Sotero, João Luiz Alberto, entre outros.

A todos que, de alguma forma, contribuíram e ainda contribuirão com o nosso trabalho.

## SUMÁRIO

SUMMARY .....	3
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	9
2.1 Contextualização.....	9
2.2 O arcabouço legal brasileiro e no Estado de São Paulo.....	16
2.3 Tecnologias para remoção de nutrientes em estações de tratamento de esgoto	18
2.4 O uso de macrófitas e sua influência no tratamento de águas residuárias .....	22
2.5 Dinâmica das lemnas na remoção de nutrientes .....	26
2.6 Manejo .....	29
2.7 Lagoas de estabilização .....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	33
3.1 Dados do sistema.....	33
3.2 Características urbanas e socioeconômica da comunidade .....	35
3.3 Hidrografia da Área de Projeto .....	35
3.4 Sistema de Esgotos Sanitários.....	35
3.5 Carga Orgânica.....	35
3.6 Dimensionamento da Lagoa facultativa .....	36
3.7 Espécie utilizada.....	36
3.8 Delineamento experimental.....	37
3.9 Monitoramento .....	37
3.10 Detalhamento das ações em cada etapa.....	39
3.11 Metodologia de análise de viabilidade econômica e financeira .....	48
3.12 Estimativa para cálculo da massa de lemnas.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50

4.1	Etapa 1 .....	50
4.2	Etapa 2 .....	62
4.3	Resultados de remoção dos nutrientes nas etapas 1 e 2.....	76
4.4	Utilização da massa seca para mistura de biossólido oriundo de ETE e uso na agricultura.....	77
4.5	Análise da viabilidade econômica do uso de lemnas para remoção de nutrientes.....	78
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
6.	CONCLUSÃO .....	82
7.	REFERÊNCIAS .....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentrações médias observadas estações de tratamento de esgoto brasileiras, com processo de tratamento por lagoa facultativa. ....	17
Tabela 2. Tecnologias, vantagens e limitações para remoção de fósforo em águas residuárias. ....	21
Tabela 3. Algumas informações de trabalhos envolvendo o uso de Lemnas no tratamento de água. ....	23
Tabela 4. Métodos utilizados no manejo e controle de macrófitas aquáticas. ....	30
Tabela 5. Principais parâmetros de projeto de lagoas de estabilização. ....	32
Tabela 6. Evolução do consumo per capita projetado para a ETE Recreio. ....	35
Tabela 7. Carga orgânica de projeto. ....	36
Tabela 8. Local de amostragem e parâmetros avaliados nas duas etapas do experimento. ....	38
Tabela 9. Variação da temperatura, OD, pH, PT e amônia das amostras coletadas na lagoa recreio, durante a primeira etapa. ....	51
Tabela 10. Biometria das lemnas. ....	56
Tabela 11. Afluente da ETE Recreio (esgoto bruto) para vários parâmetros. ....	57
Tabela 12. Efluente da ETE Recreio (efluente tratado) para vários parâmetros. ....	58
Tabela 13. Eficiência de remoção para vários parâmetros avaliados comparando amostras coletadas na entrada da lagoa (esgoto bruto) e na saída (esgoto tratado). ....	58
Tabela 14. Eficiência de remoção para os principais parâmetros de interesse, sem os “outliers”. ....	59
Tabela 15. Correlação entre os parâmetros temperatura (T), pH, oxigênio dissolvido (OD), remoção de fósforo total (RPT) e remoção de amônia (RAM). ....	62
Tabela 16. Variação da temperatura, OD, pH, PT e amônia das amostras coletadas na lagoa recreio, durante a segunda etapa. ....	63
Tabela 17. Correlação entre os parâmetros T, ph, OD, RPT e RAM. ....	67
Tabela 18. Afluente da ETE Recreio (esgoto bruto). ....	68
Tabela 19. Efluente da ETE Recreio. ....	69
Tabela 20. Eficiência de remoção. ....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul (Agência Nacional da Águas - ANA). .....	14
Figura 2. Classes da qualidade da água (ANA).....	14
Figura 3. Uso da água de acordo com a qualidade (ANA).....	15
Figura 4. Esquerda - Lagoa de Lemnaceae (Lemna minor), Direita superior - colheitadeira flutuante desenvolvida para colher a biomassa de lemnas e Direita inferior - sistema com lemnas, para polimento de efluente doméstico, com design em serpentinas. Fonte: Iqbal, 1999 e LemnaTec® apud MOHEDANO (2010). .....	25
Figura 5. Grupos ecológicos das macrófitas aquáticas. Fonte: Ferreira e Marques, 2009. ....	26
Figura 6. Representação de processos que ocorrem durante o tratamento de efluentes, em lagoas com Lemnaceae. Fonte: Mohedano (2010). .....	28
Figura 7. Curva de crescimento da Lemna minor a partir de várias concentrações de nutrientes. As concentrações informadas em A, B e C na figura referem-se à relação M/A, onde M é a quantidade em mL da solução Steinberg e A é o volume em mL de água deionizada. Ou seja, A (50/150) significa 50 mL de solução para 150 mL de água deionizada. Solução de Steinberg é um meio padrão desenvolvido especificamente para o desenvolvimento da Lemna Minor. Fonte: JERONIMO (2015). .....	29
Figura 8. Lagoa Recreio onde foram realizados os testes desta dissertação. a - Vista geral, b – Local do sistema de tratamento. Fonte: Google Maps. ....	32
Figura 9. Pontos de monitoramento da etapa 1. (1- Afluente ou entrada da ETE; 2 - Meio da primeira seção; 3 – Meio da segunda seção; 4 – Saída ou efluente tratado). ...	38
Figura 10. Tanque contendo lemnas, as quais foram arrastadas até a borda do tanque e removidas com tela. Fonte: acervo pessoal. ....	39
Figura 11. Vista da lagoa após a retirada das lemnas. ....	40
Figura 12. Detalhe da lagoa. ....	40
Figura 13. Detalhe da lagoa. ....	40
Figura 14. Detalhe da lagoa, no dia 29 de junho de 2015. Fonte: acervo pessoal. ....	41
Figura 15. Detalhe da lagoa, no dia 29 de junho de 2015. Fonte: acervo pessoal. ....	41

Figura 16. Detalhe da lagoa, no dia 30 de junho de 2015. Fonte: acervo pessoal.....	41
Figura 17. Detalhe da lagoa, no dia 30 de junho de 2015. ....	42
Figura 18. Detalhe da lagoa aos 3 dias após o início da Etapa 2 (10 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	42
Figura 19. Detalhe da lagoa aos 3 dias após o início da Etapa 2 (10 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	43
Figura 20. Detalhe da lagoa aos 4 dias após o início da Etapa 2 (11 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	43
Figura 21. Detalhe da lagoa aos 4 dias após o início da Etapa 2 (11 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	44
Figura 22. Detalhe da lagoa aos 7 dias após o início da Etapa 2 (14 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	44
Figura 23. Detalhe da lagoa aos 7 dias após o início da Etapa 2 (14 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	45
Figura 24. Detalhe da lagoa aos 8 dias após o início da Etapa 2 (15 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	45
Figura 25. Detalhe da lagoa aos 8 dias após o início da Etapa 2 (15 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	46
Figura 26. Detalhe da lagoa aos 9 dias após o início da Etapa 2 (16 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	46
Figura 27. Detalhe da lagoa aos 9 dias após o início da Etapa 2 (16 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	47
Figura 28. Detalhe da lagoa aos 10 dias após o início da Etapa 2 (17 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	47
Figura 29. Detalhe da lagoa aos 14 dias após o início da Etapa 2 (21 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	48
Figura 30. Detalhe da lagoa aos 14 dias após o início da Etapa 2 (21 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal. ....	48
Figura 31. Oxigênio Dissolvido (OD) nas amostras coletadas em 3 pontos da lagoa com lemnas, ao longo do período de amostragem. ....	53
Figura 32. Dispersão do pH ao longo do espaço e do tempo na lagoa com lemnas.....	54
Figura 33. Avaliação biométrica da lemna. ....	55

Figura 34 – Resultados para vários parâmetros da lagoa facultativa de Recreio-Charqueada – SP comparados com dados da literatura. ....	60
Figura 35. Box plot dos resultados de remoção de fósforo total na lagoa facultativa de recreio, com dois manejos. ....	61
Figura 36. Box plot dos resultados de remoção de amônia na lagoa facultativa de recreio, com dois manejos. ....	61
Figura 37. Dispersão do OD ao longo do espaço e do tempo na lagoa com lemnas, nos pontos de coleta da ETE, descritos anteriormente.....	64
Figura 38. Radiação global e radiação líquida. Fonte: Dados meteorológicos ESALQ/USP.....	65
Figura 39. Dispersão do pH ao longo do espaço e do tempo. ....	66
Figura 40. Box plot dos 30 dias de monitoramento, Etapa 2. ....	72
Figura 41. Box plot dos primeiros 15 dias de monitoramento. ....	72
Figura 42. Box plot dos primeiros 9 dias de monitoramento. ....	73
Figura 43. Box plot para o parâmetro amônia. ....	73
Figura 44. Porcentagem de remoção para alguns parâmetros de qualidade de água da Lagoa Recreio – Charqueada comparando duas avaliações realizadas com dados da literatura e sem manejo com macrófitas. ....	74
Figura 45. Remoções médias gerais comparativas considerando o tempo ótimo de manejo. ....	75
Figura 46. Precipitação a durante o experimento – Etapas 1 e 2.....	75
Figura 47. Remoções de PT diárias – Etapas 1 e 2 do experimento.....	76
Figura 48. Remoções de amônia diárias - Etapas 1 e 2 do experimento. ....	77
Figura 49. Cálculo da viabilidade econômica do tratamento. ....	80

## RESUMO

Vários estudos já foram realizados no Brasil, a grande maioria em escala de bancada, para avaliação da eficiência de remoção de nutrientes através do uso de macrófitas, atestando a sua viabilidade técnica. Os sistemas de tratamento de esgoto doméstico por lagoas não removem fósforo e nem a amônia, o que tem gerado uma série de problemas para atendimento às exigências legais brasileiras para a qualidade de corpos d'água que recebem esses efluentes. Além disso, o excesso de nutrientes ocasiona problemas ambientais que podem inviabilizar outros usos para esses recursos naturais. A ampla disseminação da tecnologia de tratamento por lagoas de estabilização se deu pelo baixo custo de implantação e operação, e pelos bons resultados para a remoção de parâmetros até o nível secundário. Portanto, o país possui um passivo ambiental significativo, o qual requer melhorias para que se ajuste à realidade que se busca alcançar com as restrições pelos órgãos ambientais e pelo arcabouço legal atualmente existente. Neste trabalho foram realizadas duas baterias de testes em escala real na Lagoa da Estação de Tratamento de Recreio, no Município de Charqueada, SP. Os testes foram feitos em dois períodos sazonais completamente distintos, e demonstraram que as variáveis ambientais como radiação solar, ventos e chuvas exercem influencia direta na capacidade de desenvolvimento e remoção de nitrogênio e fósforo para o grupo de macrófitas Lemnaceae, que se encontrava naturalmente instalado nesse sistema. Apesar disso, os resultados obtidos foram muito promissores, chegando a remoções médias de 75% para ambos os parâmetros, sendo os melhores resultados pontuais obtidos para a amônia. Outras constatações evidenciam a necessidade de aprofundamento quanto a melhor forma e periodicidade de manejo, considerando que não pode ser realizada retirada única com o risco de diminuir a capacidade de competitividade dessa macrófita com as algas, que também geraram impacto negativo nas remoções. Após essas constatações, foi realizado um estudo de viabilidade econômica, onde a alternativa de remoção de fósforo total por macrófitas considerou a mão-de-obra, periodicidade e destinação, com o diferencial de que a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo adquiriu em 2013 um equipamento de baixo custo que permite compostar a massa retirada com o lodo do esgoto e dar uma destinação agrícola ao material final. O Valor Presente Líquido (VPL)

foi positivo quando comparado à alternativa de implantar um sistema anexo à lagoa instalada, apenas para polimento; e comparado à implantação de um sistema compacto com remoção físico-química. Ambos os estudos foram analisados apenas para sistemas para remoção de fósforo total (PT), e não considerou a remoção de amônia.

**Palavras- chave:** lemnas, remoção de nutrientes, tratamento de esgoto doméstico.

EVALUATION OF FEASIBILITY AND APPLICABILITY OF AQUATIC MACROPHYTES FOR POLISH FOR SEWAGE TREATMENT PLANTS FOR WASTEWATER HOUSEHOLD. BOTUCATU, 2016. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MARIO EDUARDO PARDINI AFFONSECA

Adviser: EDUARDO LUIZ DE OLIVEIRA

## **SUMMARY**

Several studies have been conducted in Brazil, the vast majority in bench scale to evaluate the nutrient removal efficiency through the use of macrophytes, attesting to their technical feasibility. Domestic wastewater treatment systems for ponds do not remove phosphorus neither ammonia, which has generated a number of problems to meet the Brazilian legal requirements for the quality of water bodies receiving these effluents. Furthermore, the excess of nutrients causes environmental problems that may prevent other uses for these resources. The wide spread treatment technology by stabilization ponds was due to the low cost of deployment and operation, and the good results for the removal of parameters to the secondary level. Therefore, the country has a significant environmental liability, which requires improvements to fit the reality that seeks to achieve with the restrictions by environmental agencies and the currently existing legal framework. In this work were two full-scale test batteries in the Lagoon Recreational Treatment Plant in the Municipality of Recreio, SP. The tests were done in two completely different seasonal periods, and demonstrated that environmental variables such as solar radiation, wind and rain have a direct influence on the development capacity and nutrient removal for macrophyte group Lemnaceae which found itself naturally installed on this system. Nevertheless, the results were very promising, reaching mean removal of 75% for both parameters, with the best results obtained for specific ammonia. Other findings highlight the need for further development as the best way and management basis, considering that can not be performed only withdrawal at the risk of reducing the competitiveness capacity of water lettuce with algae, which also generated a negative impact on removals. Following these

findings, a study was conducted of economic viability, where the alternative removal by macrophytes considered the hand labor, timing and allocation, with the difference that the Basic Sanitation Company of the State of São Paulo acquired in 2013 one low cost equipment that allows the compost mass withdrawal with sewage sludge and to an agricultural destination to the final material. The NPV was positive when compared to the alternative of deploying an attachment system the installed pond, only for polishing; and compared to the deployment of a compact system with physico-chemical removal. Both studies were analyzed only for systems for removal of PT and did not consider the removal of ammonia.

**Keywords:** Duckweed, nutrient removal, wastewater treatment.

## 1. INTRODUÇÃO

O grande desafio para os projetistas e especialistas brasileiros é o atendimento às leis ambientais, que a partir da década de 90 passaram a ser bastante restritivas e não necessariamente para o tipo/projeto do processo de tratamento de esgotos, mas sim quanto ao atendimento às metas de qualidade do corpo receptor dos efluentes tratados. Miki et al., (2015) questionam o atual estágio legal com a realidade nacional em relação às instalações implantadas e, principalmente, licenciadas pelos órgãos ambientais; a capacidade de tratamento dessas instalações frente as metas legais; a capacidade de atuação fiscal dos agentes ambientais. Esse imbróglio todo se torna ainda mais preocupante quando se constata que: (1) lagoas de estabilização raramente foram trabalhadas, projetadas, dimensionadas considerando-se os padrões atuais e altamente restritivos de atendimento a qualidade dos corpos receptores, embora, é necessário e justo ressaltar que em 1976 já existia o Decreto 8468/76 com as respectivas exigências de atendimento e de não alteração das características dos corpos receptores; (2) devido aos baixos custos e facilidades construtivas, operacionais e de manutenção, estão altamente disseminadas no território nacional (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005).

É interessante ressaltar que uma lagoa devidamente operada tem capacidade de atendimento pleno às metas de qualidade do efluente final, mesmo para os sistemas que se encontram dentro do Estado de São Paulo, onde ainda está em vigor o Decreto 8468/76 cujas metas de remoção de sólidos ou materiais sedimentáveis e de

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) são muito mais restritivas que a atual Resolução CONAMA 430/11, sendo esta última aplicável ao restante dos Estados Brasileiros que não possuam uma lei específica e mais restritiva. Entretanto, a Resolução CONAMA 357/05, em vigor desde 2005, e válida para todo o território nacional, traz exigências para que o efluente tratado não altere parâmetros de qualidade em concentrações que seriam apenas viáveis de atendimento por sistemas com tratamento terciário, com remoção específica e para lançamento em corpos receptores com alguma capacidade de diluição. No caso do fósforo, por exemplo, a depender do tipo de corpo receptor, as concentrações são tão baixas que até mesmo tecnologias de remoção avançadas possuem dificuldade para atender (POLISEL, 2005). Soma-se a isso que alguns municípios possuem corpos receptores com baixa capacidade de diluição em relação ao volume de esgotos gerados. Conforme Polisel (2005) sabe-se que os efluentes oriundos de tratamento por lagoas de estabilização estão muito aquém do exigido pela legislação ambiental brasileira, mas para o atendimento a qualidade dos corpos receptores.

Outro lado dessa questão é quanto a quase inexistência, ou a precária condição de saneamento básico no Brasil. Dados da Agência Nacional de Águas informam que dos 50,6% de esgotos domésticos gerados, apenas 34,6% são tratados de alguma forma (ANA, 2011). Ou seja, do total gerado, pouco mais de 17% recebe algum tipo de tratamento.

Vários trabalhos científicos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de melhorar o processo de tratamento por lagoas (MOHEDANO, 2010).

Ainda, de acordo com Mohedano (2010), as plantas aquáticas são facilmente encontradas sendo que algumas fazem parte da flora nativa, e por isso observa-se sua ocorrência de forma natural em algumas lagoas de estabilização. Entretanto, sem o adequado manejo, sua presença é indesejável pelas operadoras de saneamento básico. O papel das macrófitas aquáticas no meio ambiente é considerado essencial, uma vez que atuam no ciclo de nutrientes e outras substâncias em corpos d'água (PIP; STEPAUNIK, 1992 apud BRANCO, 2012). Vários trabalhos técnicos vêm avaliando o uso potencial dessas espécies em sistemas de tratamento de esgoto, quanto ao uso mediante a aplicação e otimização da sua capacidade de absorção, assimilação e utilização por organismos fotoautotróficos não apenas para melhoria das taxas de

remoção, mas também, para estudos sobre a fixação de carbono e sua influência na geração de gases de efeito estufa (POLISEL, 2005; SUSLA; VIDOLIN, 2009; MOHEDANO, 2010).

Uma das temáticas que vem sendo amplamente estudada é o cultivo e manejo dessas macrófitas aquáticas em lagoas de estabilização, sendo que essas plantas atuam no polimento do efluente final. Essa alternativa ainda tem pouco uso em escala real em território nacional. Em outros países essa prática tem certa disseminação, como nos Estados Unidos, China, Israel, Egito e Holanda. A literatura traz como uma das vantagens os baixos custos para implantação em relação a outros processos para remoção de nutrientes em sistemas de tratamento de esgoto, como o fósforo e o nitrogênio. Também são observados menor impacto na disposição final do efluente para descarte no corpo receptor. A qualidade do efluente final também se revela viável para outros usos, como reuso industrial ou na agricultura (MOHEDANO, 2010).

No Brasil, o uso de macrófitas para remoção de nutrientes em lagoas de estabilização foi contestado por um trabalho de Polisel (2005), considerando dificuldades operacionais e custos altos de manejo para adaptação de estações de tratamento já implantadas, ou seja, que não tinham inicialmente a previsão de uso de plantas aquáticas para o fim de melhorar o efluente final.

A questão da disposição final dessa biomassa é ainda discutida, visto que em geral recomenda-se a reutilização da sua biomassa de forma a tornar o sistema sustentável, inclusive economicamente (BRANCO, 2012). Outra alternativa seria a de disposição em aterros sanitários controlados, com capacidade para recebimento desse material orgânico, porém a um custo relativamente alto no Estado de São Paulo. O trabalho experimental de Polisel (2005) demonstrara uma grande dificuldade relacionada a disposição ou utilização final da biomassa produzida.

Portanto, embora se trate de um processo interessante do ponto de vista ambiental, em vários aspectos, ainda há dúvidas quanto a sua aplicabilidade mediante a viabilidade econômica e operacional em escala real. No Estado de São Paulo, a transformação de sistemas existentes ou já implantados de tratamento, para o uso de macrófitas, também representa um importante desafio aos projetistas e engenheiros, uma vez que não é possível alterar drasticamente a forma de

desenvolvimento de um organismo vivo. Embora existam trabalhos com macrofitas nos tratamentos de água, poucos foram realizados com foco na espécie Lemnaceae.

O presente trabalho visou avaliar em escala real, em lagoa de tratamento de esgoto localizada no município de Charqueada, a adaptação, a eficiência, a viabilidade técnica e aplicabilidade de um sistema de polimento de efluentes utilizando macrófitas aquáticas do grupo Lemnaceae, cuja ocorrência se deu naturalmente, logo após o início da operação. Também apresenta uma nova proposta tecnológica para a disposição da biomassa gerada, sendo esse um dos principais fatores limitantes na aplicação de macrófitas para tratamento de esgotos, pelos volumes gerados e pelos altos custos de disposição.

### **Objetivo**

A presente dissertação tem como objetivo avaliar em escala real a eficiência, viabilidade técnica e aplicabilidade de um sistema de polimento do efluente final para remoção de nutrientes a partir do uso de macrófitas aquáticas em uma estação de tratamento de esgotos composta por lagoa de estabilização já implantada e em operação dentro dos projetos das normas técnicas brasileiras (ABNT).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Contextualização**

Em 1995, o prefácio da primeira edição, terceiro volume, de uma série de livros de autoria de Marcos Von Sperling intitulada “Princípios do tratamento biológico de águas residuárias” tratava especificamente do sistema de tratamento de esgotos por lagoas de estabilização. Esse terceiro volume descreve princípios básicos e critérios de dimensionamento para lagoas facultativas, anaeróbias, sistemas australianos, sistemas aerados e lagoas de decantação. Também trata dos aspectos construtivos e fornece diretrizes gerais que permitissem uma adequada operação. Em 2002 é apresentada nova edição, ou seja, seis anos depois, onde se lê também no prefácio que o processo de lagoas de estabilização não apresentou nesse período mudanças significativas.

O cenário brasileiro e as normas ambientais, ou os anseios de melhorar o meio ambiente, assim como novas diretrizes se apresentavam, em 2002, com maior intensidade do que na época da primeira edição. Assuntos até então não discutidos ou pouco considerados, como o reuso do efluente tratado na agricultura, parâmetros microbiológicos (protozoários), quanto à presença e impactos, os diversos resíduos gerados com destaque para o lodo, assim como a remoção de nutrientes passaram a ter mais ênfase nas discussões de projetistas e especialistas (VON SPERLING, 2002).

Um breve resgate histórico informa que a primeira lagoa para tratamento de esgotos teria sido construída em 1901, em San Antonio, Texas, Estados Unidos. Ao longo dos anos várias lagoas foram construídas, mas com o objetivo de polir o esgoto pré-tratado, ou seja, não recebia esgoto bruto. O uso intensivo de lagoas teria se dado a partir da Segunda Guerra Mundial, em acampamentos militares, em situações onde sistemas convencionais não poderiam ser facilmente instalados. Apenas em 1950, um primeiro trabalho de pesquisa sistemático foi apresentado pelo Prof. Victor Ehlers, no Congresso Interamericano de Engenharia. No Brasil, a apresentação conceitual ocorreu em um congresso com mesmo nome, em 1954, e a partir daí essa tecnologia – já melhor estudada e desenvolvida – passa a fazer parte da grade da atual Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. Com isso o uso de lagoas de estabilização em solo brasileiro intensifica-se (AZEVEDO NETTO, 1985).

Zugman (1982) apresenta percepções de vários pesquisadores quanto aos potenciais impactos da presença de alguns nutrientes e subprodutos do tratamento por lagoas, e que já motivavam estudos voltados para técnicas de polimento, aumento da eficiência de remoção, destinação adequada e a necessidade futura de reuso dos efluentes tratados para fins mais nobres. Apesar de que lagoas de estabilização já eram utilizadas há séculos na Ásia e mais recentemente na Alemanha e na Austrália.

No que diz respeito à evolução dessa tecnologia, constata-se que houve uma dificuldade no Brasil para adaptar o modelo originário de outros países para a realidade brasileira, de forma que se pode afirmar que grande parte das lagoas construídas e em operação no território nacional não aproveitou adequadamente as eficiências que esses sistemas podem apresentar. Estudos mais recentes com o objetivo de estudar e adaptar as lagoas para melhores resultados focam principalmente na eficiência máxima de remoção da DBO (KAWAI et al., 2012). Entretanto, esses sistemas apresentam eficiência de remoção para diversos outros parâmetros de importante caráter ambiental, o que é de conhecimento dos especialistas há décadas (ZUGMAN, 1982; BERNARDES, 1986; VON SPERLING, 2002).

O Manual de “Avaliação de desempenho de lagoas de estabilização”, da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) cuja última edição é de 1990, informa que naquela época estariam em operação no país mais de cem lagoas, alocadas nos estados das regiões Centro, Sul, Leste e Nordeste. Em um

levantamento mais recente de Oliveira e Von Sperling (2005) é avaliado o desempenho de 166 sistemas de tratamento de esgotos em Minas Gerais e São Paulo, dos quais 73 são lagoas facultativas, 43 são lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas e 13 são lagoas aeradas.

O impacto do lançamento de efluentes originados de estações de tratamento de esgotos em corpos d'água é motivo de grande preocupação em escala mundial. O Brasil possui um rico arcabouço legal, além de políticas públicas e literatura científica com influência na forma como o assunto é tratado pelas concessionárias de tratamento de esgoto. As exigências são tanto no aspecto de atendimento a requisitos legais de padrões de emissão quanto da sustentabilidade ambiental e a gestão adequada de resíduos (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005).

É incontestável que a poluição dos corpos d'água e suas causas estão relacionadas com a presença de contaminantes em excesso, para os quais os processos naturais de autodepuração são insuficientes na assimilação, podendo resultar em alterações físicas, químicas e biológicas que tendem a afetar a variabilidade de usos.

Entretanto, o que é poluição? Como se determina que um corpo d'água esteja poluído perante o ponto de vista jurídico-legal brasileiro? Qual o papel das concessionárias ou responsáveis pelos tratamentos dos esgotos, assim como dos fiscais? Quais os desafios que impedem investimentos maciços para sanar esses problemas – falta de capacidade econômica e/ou mão-de-obra especializada, baixa remuneração ou retorno?

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA)<sup>1</sup>:

*“O enquadramento de corpos d'água estabelece o nível de qualidade a ser alcançado ou mantido ao longo do tempo. Mais do que uma simples classificação, o enquadramento deve ser visto como um instrumento de planejamento, pois deve tomar como base os níveis de qualidade que deveriam possuir ou ser mantidos para atender às necessidades estabelecidas pela sociedade e não apenas a condição atual do corpo d'água em questão. O enquadramento busca “assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas” e a*

---

<sup>1</sup> ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Planos de Recursos Hídricos e o Enquadramento de Corpos d'Água. Disponível em: [http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/planejamento/PlanejamentoRH\\_enquadramento.aspx](http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/planejamento/PlanejamentoRH_enquadramento.aspx) acesso em 12 de Dezembro de 2015.

*“diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes” e “a classe do enquadramento de um corpo d’água deve ser definida em um pacto acordado pela sociedade, levando em conta as prioridades de uso da água.” (Art. 9º, Lei nº 9.433, de 1997)”.*

Se em 1997 é apresentada diretriz que exige a participação social e o planejamento na definição do que passa a ser considerada qualidade para um corpo d’água, por outro lado, no Estado de São Paulo, na década de 1970 essas definições foram então arbitradas e nunca mais revisitadas e nem revistas, com exceção de dois rios que tiveram suas classes alteradas para uma de qualidade superior ao que foram enquadrados – o Rio Jundiá na Resolução 161 do Conselho de Recursos Hídrico (CRH-161), no município de mesmo nome; e o Rio Lavapés, no município de Botucatu na Deliberação 317 do Comitê de Bacias Hidrográficas do rio Sorocaba e Médio Tietê (CBH-SMT-317). O enquadramento dos rios se dá por classes de qualidade, e cada classe é definida por padrões de qualidade que vão de muito restritivos até a quase ausência de restrições, por exemplo, para a Classe 4. A Resolução CONAMA 357/05 estabelece as classes de qualidade das águas superficiais.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) no Brasil prima pela busca de múltiplos usos das águas – o que representa a busca por uma qualidade superior. O uso da água relaciona-se com requisitos pré-definidos de qualidade que consideram as variáveis que precisam ser atendidas para que o uso desejado seja viável. Portanto, conforme exemplo apresentado pela ANA<sup>2</sup>, e os conceitos gerais, enquanto para que a fauna aquática quase uma centena série de parâmetros precisa estar controlada, para o uso de navegação basta que materiais flutuantes e sedimentáveis não ocorram em excesso.

Embora a agência e a própria PNRH definam que o enquadramento de um corpo d’água se dá pela influencia de aspectos técnicos, econômicos, sociais e políticos, na prática se constata que tanto o arcabouço legal e seus instrumentos disponíveis não comungam com essa diretriz, já que para determinadas condições, situações e regiões o atendimento é desafiador por outras causas de grande

---

<sup>2</sup> ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Enquadramento- Bases Conceituais. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/enquadramento-bases-conceituais.aspx#>> acesso em 12 de Dezembro de 2015.

complexidade, conforme exemplo a seguir. Se a ANA<sup>2</sup> afirma que “*o enquadramento é um processo que procura garantir padrões de qualidade da água compatíveis com os usos que dela se faz ou se pretende, em equilíbrio com a capacidade de investimentos da sociedade, representada pelos governos e atores envolvidos*”, constata-se que na prática e no Estado de São Paulo, essa assertiva não é considerada.

Um exemplo para esses casos são os corpos d’água superficiais com usos diversos, como o Rio Paraíba do Sul, que possui como usos informados pela ANA<sup>3</sup> o abastecimento público, a diluição de esgotos, a irrigação e a geração de energia elétrica. Suas regras operacionais são apresentadas na Figura 1. Conforme relatório da CETESB (2003) a regra operativa dos reservatórios existentes nas cabeceiras do Rio Paraíba do Sul acarretavam uma baixa disponibilidade hídrica ao longo do rio (baixas vazões), mesmo no período chuvoso, levando uma piora da qualidade da água. Concluiu-se que a condição hidráulica observada no período, no caso em 2003 associado a outros fatores seriam os responsáveis pelo não atendimento a padrões de qualidade na classe de enquadramento.

---

<sup>3</sup> ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Bacia do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/outorgaefiscalizacao/RioParaibadoSul.aspx>> acesso em 12 de Dezembro de 2015.



USOS DAS ÁGUAS DOÇES		CLASSES DE ENQUADRAMENTO				
		ESPECIAL	1	2	3	4
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas		Classe mandatória em Unidades de Conservação de Proteção Integral				
Proteção das comunidades aquáticas			Classe mandatória em Terras Indígenas			
Recreação de contato primário						
Aquicultura						
Abastecimento para consumo humano		Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento convencional ou avançado	
Recreação de contato secundário						
Pesca						
Irrigação			Hortalças consumidas cruas e frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película	Hortalças, frutíferas, parques, jardins, campos de esporte e lazer,	Culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras	
Dessedentação de animais						
Navegação						
Harmonia paisagística						

Observação: As águas de melhor qualidade podem ser aproveitadas em uso menos exigente, desde que este não prejudique a qualidade da água.

**Figura 3.** Uso da água de acordo com a qualidade (ANA).

A construção de um sistema de tratamento de esgotos pressupõe uma série de marcos temporais: a) um parecer situacional e um diagnóstico de uma região onde se instalará o sistema; b) projeções de crescimento e uso, uma vez que uma planta de tratamento representa investimento expressivo e seu uso deverá se dar por várias décadas; c) elaboração de projeto, emissão de licença prévia pelo órgão ambiental; d) início das ações para implantação do projeto, o que em geral leva vários anos desde a liberação das áreas, instalação de redes de esgotamento sanitário que conduzam os esgotos coletados para a estação de tratamento, a construção da estação em si, aquisição de equipamentos, etc; e) emissão da licença de instalação; f) início da operação e a constatação de falhas a serem sanadas para atender a legislação vigente e obtenção da licença final de operação, a ser renovada de tempos em tempos pelo órgão ambiental (CETESB, 2007).

A licença de operação ainda define exigências específicas a serem cumpridas e que delimitam a ação de fiscalização. Portanto, para que todo esse complexo possa tramitar da forma mais correta possível, é necessário que o aparato legal, as normas, as exigências e o planejamento estejam alinhados e sejam coerentes com a realidade.

É importante também que fique claro que o meio ambiente não pode ser tratado por partes, fragmentado. O Decreto 8468/76, embora demasiado antigo, foi elaborado dentro de uma visão ampla, sistêmica. Trata-se de uma das poucas leis, talvez a única, que abrange vários aspectos, fontes e rotas de poluição, embora sua tratativa geral seja tímida quando se particiona o ambiente em solo, ar e água. Entretanto, não há um cruzamento dessas informações perante as várias matrizes ambientais. O meio ambiente recebe impactos de várias fontes, e por diferentes rotas, cada qual com seu peso – peso esse que na grande maioria dos casos não é considerado e nem mensurado. Da mesma forma que a interação do meio atingido com tais fontes exerce peso essencial na dispersão ou não desses poluentes conforme podem-se constatar a partir de relatórios técnicos nacionais (ANA, 2007).

E é isso o que será tratado nesta revisão bibliográfica, de forma a dimensionar o que for possível sobre a problemática existente, tendo o tratamento de esgotos por lagoas e seus impactos provavelmente uma parcela de influência nesse amplo e complexo tema que é a poluição dos corpos d'água e a poluição ambiental.

## **2.2 O arcabouço legal brasileiro e no Estado de São Paulo**

É interessante apresentar as discrepâncias do modelo regulador brasileiro, o que impõe um desafio na hora de se projetar, implantar e operar uma ETE, do início e principalmente ao longo dos anos e durante todo o tempo de vida útil para o qual o sistema foi projetado.

*“No Brasil, o modelo regulador referente à operação de ETEs baseia-se em dois princípios:*

*a) padrões de lançamento do efluente final em corpo receptor: o processo de tratamento da ETE deve garantir certo nível mínimo de qualidade;*

*b) manutenção da qualidade do corpo receptor em função do lançamento do efluente final: o efluente final não pode alterar as condições de classe do corpo receptor.*” (MIKI et al., 2015)

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação entre as concentrações efluentes reportadas em alguns trabalhos científicos, assim como as leis específicas e valores limitantes para o efluente final. Verifica-se que há uma diferença significativa entre os dados de literatura, os de levantamentos científicos e os dados reais observados em ETEs em monitoramento de uma operadora de saneamento do Estado de São Paulo para 70 sistemas compostos por lagoas, sendo a grande maioria de lagoas facultativas.

**Tabela 1.** Concentrações médias observadas estações de tratamento de esgoto brasileiras, com processo de tratamento por lagoa facultativa.

Parâmetros	Faixas			Decreto 8468/76	CONAMA 430/11
	1	2	3		
	..... mg L <sup>-1</sup> .....				
DBO	0 a 80	6 a 176	0 a 624	80% remoção ou 60 mg L <sup>-1</sup>	60% de remoção ou 120 mg L <sup>-1</sup>
DQO	120 a 200	342 a 676	180 a 1.402	Não há meta	Não há meta
SST	60 a 90	132 a 343	97 a 561	Não há meta	Não há meta
PT	> 4	2 a 7	6,6 a 11,2	Não há meta	Não há meta
CF	10 <sup>6</sup> a 10 <sup>7</sup>	2x10 <sup>5</sup> a 2x10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> a 6x10 <sup>8</sup>	Não há meta	Não há meta
	..... ml L <sup>-1</sup> .....				
SS	Não consta	Não consta	0 a 9	<= 1 ml L <sup>-1</sup>	<= 1 ml L <sup>-1</sup>

Fonte: OLIVEIRA; VON SPERLING (2005) e POLISEL (2005).

DBO – demanda bioquímica de oxigênio; DQO – demanda química de oxigênio; SST – sólidos em suspensão total; PT – fósforo total; CF – coliformes fecais. SS – sólidos ou materiais sedimentáveis. (1) Faixa reportada pela literatura e adaptada de von Sperling (2005); (2) Faixas observadas: foram utilizados os percentis 10% (valor mínimo) e 90% (valor máximo); (3) Faixas observadas pela SABESP.

O Decreto 8468/76, além das metas de qualidade do efluente tratado, também estabelece limites de qualidade para os corpos d'água e define classes de qualidade (que no Estado de São Paulo foram delimitadas pelo Decreto nº 10.755/77

e dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto n. 8.468 (1), de 8 de setembro de 1976, e dá providências correlatas). De forma que o lançamento de um efluente de uma ETE deve obrigatoriamente obedecer aos padrões de qualidade estabelecidos na década de 70 e que valem até os dias atuais. Ações complementares para garantia desse atendimento são tratadas durante o licenciamento ambiental, através da emissão de licenças pelos órgãos ambientais (MIKI et al., 2015).

Importante ressaltar que para o parâmetro relacionado às parcelas nitrogenadas em corpos d'água, o Decreto 8468/76 estabelece uma concentração de amônia limite para a classe 2 até sete vezes menor que a lei federal, mais atualizada, a Resolução CONAMA 357/05. Fatos como esse geram dúvidas sobre como explicar tecnicamente tamanhas diferenças sem considerar os avanços científicos em quase 40 anos para a definição de um valor limite mais coerente com a realidade.

### **2.3 Tecnologias para remoção de nutrientes em estações de tratamento de esgoto**

A preocupação quanto à remoção de nutrientes no tratamento de esgotos, segundo Miki et al., (2015) ocorre, no mundo, desde o desenvolvimento da tecnologia de tratamento de esgotos por lodos ativados, em 1914. Conforme Van Haandel e Marais (1999, apud MIKI et al., 2015) a remoção de nitrogênio em sistemas de lodos ativados adaptados para esse fim ocorre nos anos 1950. A percepção quanto ao problema de eutrofização dos corpos d'água dá-se na década de 1960, a partir do lançamento de esgotos tratados sem a remoção de parâmetros de nitrogênio e fósforo. A presença de fósforo total em concentrações indesejáveis pode ocasionar o fenômeno conhecido como eutrofização, em corpos d'água.

Segundo Von Sperling (1996), “a eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas, tanto planctônicas quanto aderidas, a níveis tais que sejam considerados como causadores de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água (THOMANN; MUELLER, 1987).” Onde os principais fatores de estímulo são a presença excessiva de nutrientes no corpo d'água, principalmente nitrogênio e fósforo (VON SPERLING, 1996). O tratamento terciário passa a ser desenvolvido e aplicado

para garantir não só a remoção de material sólido (tratamento primário) e matéria orgânica (tratamento secundário), mas também de nutrientes e patógenos.

A Resolução CONAMA 357/05 traz inovações e limites mais restritivos, sendo, portanto aplicável ao Estado de São Paulo para o parâmetro fósforo em corpos d'água – surge nessa resolução a definição de ambientes lênticos, lóticos e tributários intermediários. A grande maioria dos corpos d'água no Estado de São Paulo são do tipo classe 2, por isso serão apresentados os limites para essa classe. Portanto, para ambientes lênticos, lóticos e/ou tributários intermediários classe 2, tem-se respectivamente as seguintes concentrações limites para o fósforo: 0,03 e 0,05 mg L<sup>-1</sup>. Conforme Miki et al., (2015), essas exigências requerem razões de diluição do efluente a ser lançado em relação ao corpo receptor da ordem de 20 a 40 vezes, no caso de tratamento convencional.

A partir dos dados da Tabela 1 constata-se que as concentrações de fósforo total em efluente tratado de lagoas estão muito distantes das concentrações desejáveis para lançamento em um corpo receptor se a razão de diluição fosse 1:1. A concentração média de 6 mg L<sup>-1</sup> exigiria uma diluição de mais de 100 vezes, ou seja, o efluente tratado deveria ser lançado em um corpo receptor com vazão mais de 100 vezes maior que a vazão gerada na ETE. A alternativa seria “melhorar” o processo de tratamento propiciando essas remoções. Os custos para a implantação de um processo de tratamento de esgotos devem considerar não apenas a construção e equipamentos, ou seja, a instalação ou planta final. Há de se avaliar os custos contínuos com produtos químicos, operação e complexidade operacional (gastos com recursos humanos mais ou menos especializados), manutenção, gasto energético, geração e disposição de resíduos sólidos, monitoramento e licenças (MIKI et al., 2015).

A tecnologia a ser empregada dependerá ainda da classe do corpo receptor, razão de diluição (quanto menor, maior a exigência de remoção), entre outras exigências que podem ser apresentadas pelo órgão ambiental durante o processo de licenciamento.

No Brasil existe uma estação de tratamento de esgotos (ETE) no município de Araruama, região dos lagos, Estado do Rio de Janeiro com uso de macrófitas aquáticas. A ETE Ponte dos Leites trata 170 L s<sup>-1</sup> de esgoto de uma população de cerca de 120 mil habitantes. O sistema é constituído por tratamento

primário para retirada de material sólido; aeração forçada em lagoas; e nas antigas lagoas utilizadas apenas para sedimentação (ou decantação), foram instaladas vários tipos de macrófitas aquáticas, vulgarmente chamadas de Papirinho, Sombrinha Chinesa e *Salvinia*. O manejo é feito manualmente através do uso de peneiras. Em matéria exibida no dia 13/08/2014, no Programa Cidades e Soluções da Globonews a concessionária informa que a economia em relação ao uso de produtos químicos, no caso o cloreto férrico, para obter os mesmos resultados de remoção de fósforo, seria de 75% - o custo mensal seria de R\$ 77.000,00 enquanto com o uso das plantas o custo é considerado “zero”. Também é informado sobre a economia em relação a energia elétrica, onde a diferença é de 8 vezes (R\$ 22.000,00 para um sistema convencional)<sup>4</sup>.

O vídeo do programa não é claro sobre a forma como o tratamento é realizado. Percebe-se que foram implantadas faixas de contenção superficiais e que as salveiras são restritas a cerca de 1/3 da área da lagoa de sedimentação. Já as demais espécies apresentam-se aparentemente em um rio após o lançamento dos efluentes, ou seja, ocorre um tratamento no corpo receptor, o que não é aceitável no Estado de São Paulo. O tratamento deve ocorrer em sua completude dentro dos limites da planta de tratamento.

O documentário demonstra ainda uma solução para o resíduo final, onde a biomassa retirada é triturada e misturada ao lodo e depositada em uma estufa e realizada compostagem. A produção de lodo mensal dessa ETE é de 10 Mg mês<sup>-1</sup> e a de macrófitas, 45 Mg mês<sup>-1</sup>. Entretanto, a compostagem reúne o lodo de outras ETEs da mesma concessionária. O custo de destinação para aterros sanitários era de R\$ 250 ton<sup>-1</sup> (agosto/2014). A concessionária cedeu a área e a exploração do composto orgânico para uma empresa de paisagismo da região.

A remoção de fósforo total em águas residuárias pode ocorrer por diversas tecnologias diferentes, com seus respectivos custos e desafios operacionais. Oliveira (2004) apresenta uma metodologia científica para escolha de um sistema de tratamento de esgotos quando da fase de planejamento, onde a tomada de decisão deve considerar o melhor sistema que minimize o consumo de energia e outros insumos, os resíduos gerados, os custos de implantação, operação e manutenção, com garantia de

---

<sup>4</sup> Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=IJe4PrH3obc> acesso em 15 de janeiro de 2016.

eficiência de remoção de poluentes e matéria orgânica, atendendo ainda aos requisitos ambientais locais. Entretanto, o trabalho não considera a remoção de nutrientes.

Maroneze et al., (2014) compilaram um resumo (Tabela 2) com as principais alternativas para a remoção de fósforo em águas residuárias.

**Tabela 2.** Tecnologias, vantagens e limitações para remoção de fósforo em águas residuárias.

Tecnologia	Quantidade de P mg L <sup>-1</sup>	Eficiência %	Vantagens	Limitações
Precipitação química	> 50	60-95	Facilidade de operação Robustez	Alto custo operacional Lodo químico requer gerenciamento
Adsorção	0,5-50	75-90	Facilidade de operação  Eficiência de remoção independente da concentração de fósforo	Elevado custo operacional dos adsorventes
Remoção biológica aprimorada	10-125	75-98	Ausência de produtos químicos Remoção paralela de nitrogênio	Operação complexa Produção elevada de lodo biológico Difícil recuperação do fósforo do lodo
Wetlands	>0,3	65-99	Elevada eficiência de remoção Reuso da biomassa como fonte de proteínas e carboidratos	Operação complexa Baixa tolerância a elevadas cargas Sensível a baixas temperaturas
Biorreatores microalgais	>0,1	85-100	Alta eficiência de remoção Remoção paralela de matéria orgânica e nitrogênio	Dificuldade de escalonamento Instabilidade operacional
Fertirrigação	Não se aplica	100	Reuso da biomassa como fonte de proteína, gordura e pigmentos naturais Reuso de compostos fertilizantes Reuso da água	Complexa logística de distribuição

Fonte: Adaptado de MARONEZE et al., 2014.

Além da definição da tecnologia mais apropriada a ser aplicada em cada caso, a viabilidade técnica e econômica precisam ser consideradas, podendo se tornar o maior limitante para a implantação em diversos locais. Lagoas de estabilização podem sofrer adaptações que permitam que o atendimento à legislação ocorra (USEPA, 2013). Entretanto, alguns custos podem ser proibitivos, tornando mais interessante avaliar a implantação de um novo sistema ao invés da adaptação do já existente. Entretanto, não se pode simplesmente “abandonar” um processo desses. Um sistema obsoleto ou com problemas é tratado no jargão técnico ambiental brasileiro como se tratando de um “passivo ambiental”. Segundo Almeida Neto (2001, apud POLISEL, 2004), em 2001 o passivo ambiental existente apenas no noroeste do Estado de São Paulo para 70 lagoas seria atualmente de R\$ 34.840.804,60<sup>5</sup>.

#### **2.4 O uso de macrófitas e sua influência no tratamento de águas residuárias**

Nos Estados Unidos, Hookerton, na Carolina do Norte, encontra-se um dos primeiros sistemas a utilizar lemnas em estações de tratamento de esgoto com alta escala e como tratamento terciário. Os volumes de esgoto tratado são de aproximadamente 200.000 pessoas, e cerca de 38.000 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>. A Lemna Corporation. Inc<sup>6</sup> é exemplo de um conjunto de empresas que investem em tecnologias neste setor, entre elas, maquinário para colher a biomassa de lemnas produzida nos tratamentos (MOHEDANO, 2010).

Em boa parte dos trabalhos técnicos elaborados no Brasil com uso de macrófitas aquáticas no polimento do efluente final, foi realizada em sistemas pilotos com resultados muito promissores. Alguns resultados e as respectivas conclusões com vantagens e desvantagens do uso de macrófitas, em trabalhos especificamente com lemnas, são apresentados na Tabela 3.

---

<sup>5</sup> Valor atualizado pelo índice IPCA-IBGE para a data base janeiro de 2016, utilizando a ferramenta "Calculadora do Cidadão" do Banco Central do Brasil, disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>>

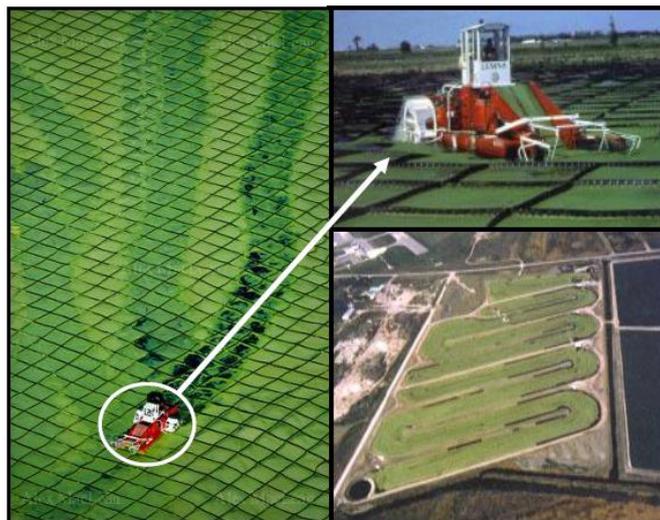
<sup>6</sup> Disponível em: <http://www.lemnatechnologies.com/index.php> acesso em 15 de janeiro de 2016.

**Tabela 3.** Algumas informações de trabalhos envolvendo o uso de Lemnas no tratamento de água.

Objetivo do trabalho	Remoção	Parecer/ Conclusões	Autor
Tratamento de esgotos da suinocultura com lemnas e aproveitamento da biomassa para alimentação de tilápias.	P = até 66% N-NH <sub>4</sub> = até 77% (21 dias sem manejo)	Viabilidade de uso econômico para ração de tilápias. Escala piloto, por apenas 21 dias	TAVARES (2004)
Chicaneamento de lagoas e introdução de macrófitas aquáticas (aguapé e lemna) para tratamento de águas residuárias.	Abaixo de 10%.	Não recomenda. O autor fala da dificuldade de manejo, alta produtividade e falta de alternativas economicamente interessantes para disposição. Também menciona que a lemna foi forçadamente introduzida na lagoa e acabou contaminando corpos d'água a jusante.	POLISEL (2005)
Avaliar o potencial de macrófitas Lemnaceae como uma tecnologia para o tratamento e valorização dos efluentes líquidos e gasosos da suinocultura - desenvolvido em escala real e bancada	NTK= 98% N-NH <sub>3</sub> = 99% PT= 94%	Obtenção de ótimos resultados de remoção; baixo custo; utilização da biomassa na própria suinocultura. O manejo precisa ser muito bem realizado para assegurar a manutenção da eficiência. No estudo o autor informa que o manejo interferiu mais do que outras variáveis (clima, temperatura, etc.)	MOHEDANO (2010)
Potencial de remoção de nutrientes, azoto e fosforo, em efluente de aquicultura, de duas espécies de lentilha-de-água	P = entre 71 e 78% N = até 58%	Atendeu as expectativas do autor, mas o mesmo recomenda testes por períodos mais longos e em escala real.	BRANCO (2012)
Avaliação do potencial de duas espécies de lentilha-de-água <i>Lemna minor</i> e <i>Lemna gibba</i> na remoção de nutrientes em efluente aquícola	Para <i>Lemna minor</i> , PT = 54,77% NT = 61 a 64%	Pequena escala, bancada. Recomendação de testes em escala real,	BRANCO (2012)

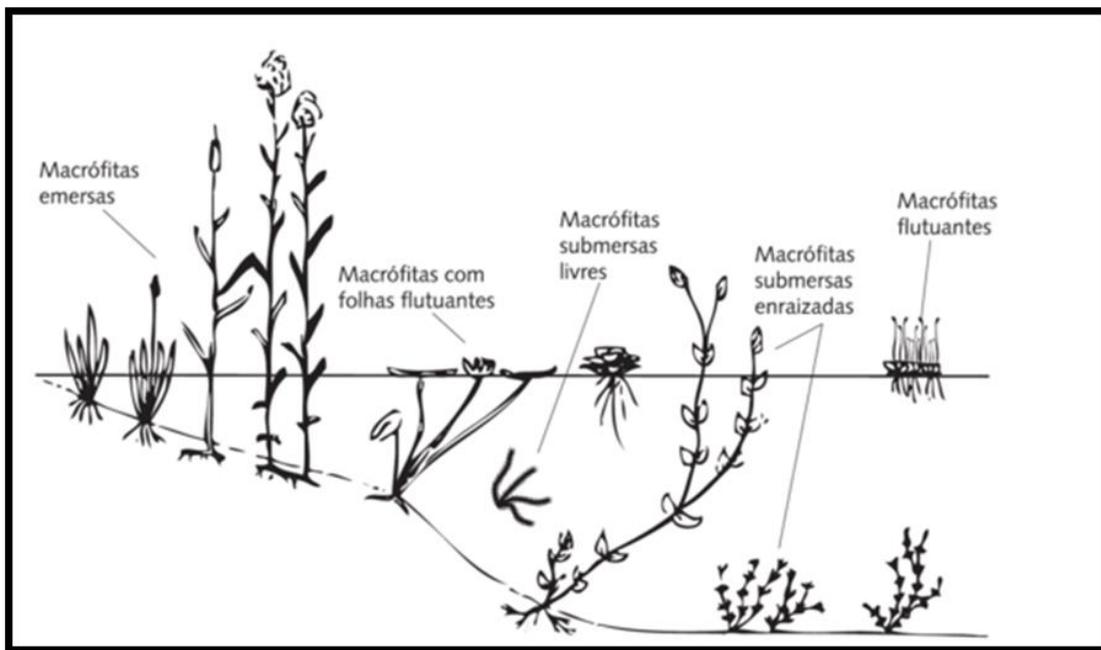
Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbico em lagoa com lemna	PT = até 83%	Notou influencia do TDH na eficiência de remoção das lemnas. apresentou capacidade de promover melhor polimento das águas residuárias, quando em comparação com outras espécies vegetais, pois essa possui baixo conteúdo de fibras (aproximadamente 5%), assim não requer estrutura de sustentação, logo o seu tecido é quase todo fotossinteticamente ativo, o que lhe confere alta atividade metabólica, e isso reflete diretamente em taxas elevadas de sua produção e de recuperação das substâncias presentes nas águas residuárias domésticas	LUBARINO (2013)
Avaliar o potencial de um sistema de lagoas de lemnas ( <i>Landoltia punctata</i> ) no tratamento de esgoto doméstico e fixação de gás carbônico, em escala piloto.	N= 85,4% P = 80%	Uso econômico da biomassa, ótimos resultados de remoção. Foi realizado em escala piloto por poucos meses. A autora recomenda escala real e maior período.	BRUGNAGO (2014)
Avaliação de lagoas de Lemnaceae no polimento de esgoto doméstico e produção de biomassa	NT = 74% PT = 67%	Experimento foi realizado em escala piloto, em tanque com volume de 0,44 m <sup>3</sup> , utilizando o efluente de lagoa de estabilização por 21 dias.	GARCIA (2015)

Para tratamento terciário de esgoto doméstico, na Carolina do Norte – USA utiliza-se uma colheitadeira flutuante desenvolvida para colher a biomassa de lemnas (*Lemna minor*) (Figura 4a). Há quadrados visíveis de tubos plásticos flutuantes para que as lemnas não sejam arrastadas pelo vento (Figura 4b), cada quadrado possui (2,5 x 2,5m). Alguns sistemas podem apresentar design em serpentina para polimento, conforme pode ser observado na (Figura 4c).



**Figura 4.** Esquerda - Lagoa de Lemnaceae (*Lemna minor*), Direita superior - colheitadeira flutuante desenvolvida para colher a biomassa de lemnas e Direita inferior - sistema com lemnas, para polimento de efluente doméstico, com design em serpentinas. Fonte: Iqbal, 1999 e LemnaTec® apud MOHEDANO (2010).

As macrófitas aquáticas crescem abundantemente em ambientes eutrofizados, assim como são observadas ocorrências naturais em lagoas de tratamento de esgotos. Tavares (2004) classifica as macrófitas em 4 tipos: submersas, integradas, flutuantes e enraizadas. As flutuantes possuem folhagem, não se fixam a um local – por exemplo, a espécie a ser estudada neste trabalho, o gênero *Lemna* ssp. ou *duckweed*. A família Lemnaceae Gray é uma angiosperma, no Brasil conhecida como “lentilha d’água” (POTT e CERVI, 1999). Formam ainda um elo na cadeia trófica, pois servem de alimento para peixes e aves, abrigo da microfauna e ainda para remoção das cargas de poluentes. Ocorrem no Pantanal e têm um papel importante no ecossistema dessa região, segundo Pott e Cervi (1996) (Figura 5).



**Figura 5.** Grupos ecológicos das macrófitas aquáticas. Fonte: Ferreira e Marques, 2009.

Tavares (2004) faz breve revisão onde constata que as lemnas apresentam melhor desempenho do que aguapés no tratamento de esgotos. Mohedano, (2010) também informa que as lemnas apresentam as maiores taxas de crescimento entre as plantas vasculares, com aumento em 100% da biomassa a cada dois ou três dias dependendo das condições gerais ambientais e nutritivas, com diminuição da taxa de crescimento especialmente no inverno e no verão (REJMÁNKOVÁ, 1971; SAID et al., 1979; PORATH; POLLOCK, 1992; JOURNEY et al., 1993 apud TAVARES, 2004).

Mohedano (2010) destaca lacunas de conhecimento que ainda persistem para que o uso dessas macrófitas seja implementado de forma otimizada. Maiores pesquisas seriam necessárias voltadas para a influência das várias climáticas, variação das cargas de esgoto e características físicas e químicas, variações biológicas da espécie estudada *versus* a microbiota instalada, além das variáveis de engenharia.

## 2.5 Dinâmica das lemnas na remoção de nutrientes

A ideia da utilização de algumas espécies de macrofitas aquáticas como uma tecnologia no tratamento de efluentes está baseada em uma aptidão natural desses organismos a se desenvolverem em ambientes eutrofizados, assim como as lagoas de tratamento (MOHEDANO, 2010). Von Sperling (2009) menciona a

lentilha d'água ou lemnas como uma alternativa interessante e viável para o polimento de efluentes de lagoas de estabilização.

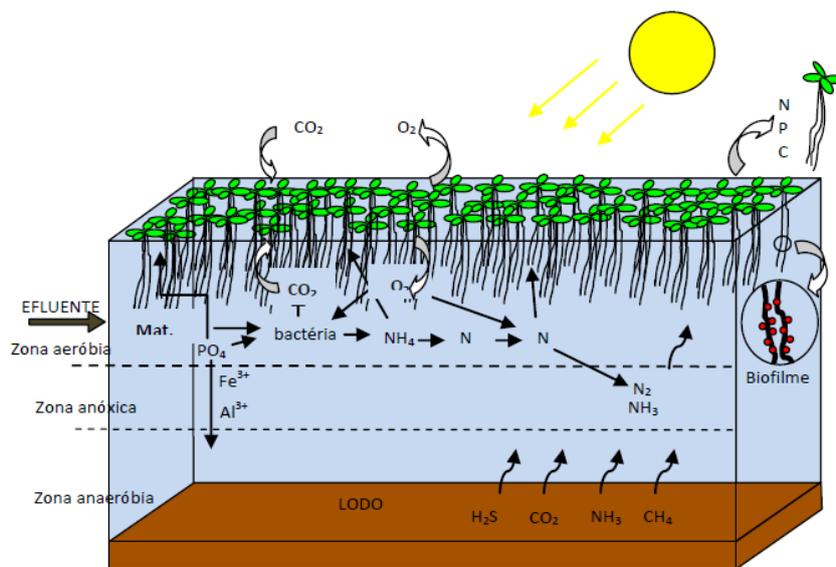
A mecânica de remoção dos nutrientes do meio aquático pelas plantas aquáticas se dá através da assimilação, e por uma complexa variedade de processos químicos, físicos e biológicos. Associada a ação da macrófita ocorrem ainda outros processos que incluem a sedimentação, absorção e precipitação. De acordo com Godfrey et al., (1985 apud TAVARES, 2004) essas plantas propiciam um crescimento bacteriano que exerce ação importante nos resultados finais de remoção. A remoção dos compostos nitrogenados se dá pela absorção direta da planta, ação dos microrganismos fixados nas raízes e pela volatilização da amônia (TAVARES, 2004 apud KÖRNER; VERMAAT, 1998).

A forma como o nitrogênio amoniacal se apresenta, que depende do pH, é determinante para o crescimento das Lemnaceae, pois em concentrações acima de 50 mg L<sup>-1</sup> de amônia ocorre inibição de crescimento (CAICEDO et al., 2000 apud TAVARES, 2004).

A literatura informa que, pelo fato de as lemnas formarem uma camada na superfície da água – aglutinam-se e até se sobrepõem entre si, o que dificulta a passagem de luz para a superfície líquida, com sombreamento e conseqüente impedimento do crescimento algal. Essas condições propiciam uma menor turbidez (que seria ocasionada pela presença da massa algal), assim como uma estabilização dos níveis de oxigênio (SKILLICOM et al., 1993; MOHEDANO, 2010 apud BRUGNAGO, 2014).

A influência das lemnas na eficiência de remoção de matéria orgânica no processo ocorreria de forma indireta, através das bactérias anaeróbias e aeróbias aderidas à área superficial dessas plantas, além dos microrganismos que já são presentes no meio líquido e os atuantes no sedimento – ocorrem naturalmente nas lagoas de estabilização (IQBAL, 1999; CROSS, 2006 apud BRUGNAGO, 2014).

Na Figura 6 há um desenho esquemático sobre como funciona uma lagoa de estabilização com lemnas.

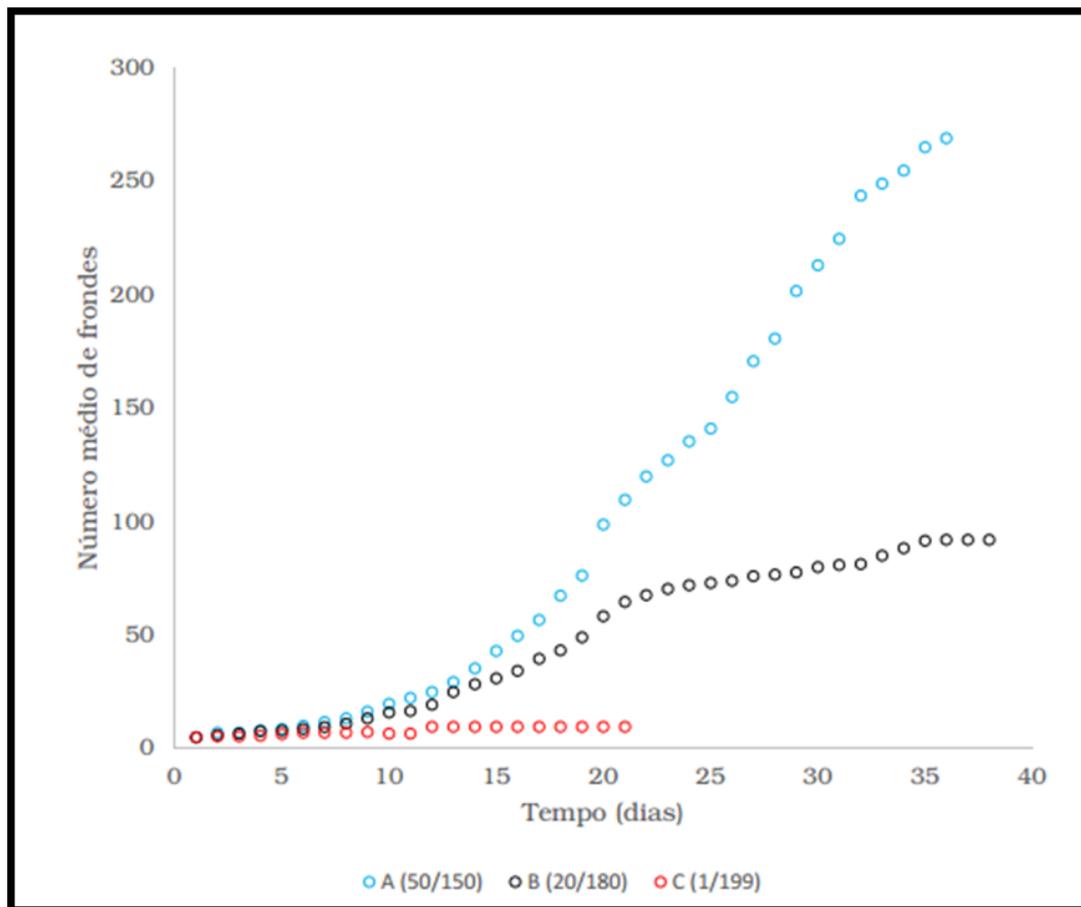


**Figura 6.** Representação de processos que ocorrem durante o tratamento de efluentes, em lagoas com Lemnaceae. Fonte: Mohedano (2010).

As lemnas exercem ainda influência na redução de formação de odores, remoção de sólidos suspensos, remoção de metais pesados e patógenos (MOHEDANO, 2010).

No que diz respeito à engenharia e operação, as variáveis a serem consideradas neste trabalho não estarão sendo alteradas para implantação das macrófitas. Portanto, será discutido em capítulo específico sobre as variáveis da estação de tratamento que se adaptou às lemnas, e para lagoas em geral.

De qualquer forma, um projeto de engenharia com objetivo de utilização de macrófitas no seu processo deve considerar os fatores que regularizam o seu desenvolvimento, sendo alguns mencionados por Ferreira e Marques (2009), assim como a utilidade de modelos determinísticos como ferramenta de previsão da dinâmica de crescimento dessa vegetação. No caso da *Lemna minor*, Jeronimo (2015), após avaliação comparativa de 5 modelos, concluiu que o modelo logístico é o que melhor descreve essa dinâmica. O experimento de Jeronimo (2015) utilizou-se das melhores condições de crescimento, em bancada, com monitoramento por 38 dias consecutivos e apresenta a relação entre a disponibilidade de nutrientes e o desenvolvimento dessa espécie (Figura 7).



**Figura 7.** Curva de crescimento da Lemna minor a partir de várias concentrações de nutrientes. As concentrações informadas em A, B e C na figura referem-se à relação M/A, onde M é a quantidade em mL da solução Steinberg e A é o volume em mL de água deionizada. Ou seja, A (50/150) significa 50 mL de solução para 150 mL de água deionizada. Solução de Steinberg é um meio padrão desenvolvido especificamente para o desenvolvimento da Lemna Minor. Fonte: JERONIMO (2015).

## 2.6 Manejo

A presença de macrófitas em sistemas de tratamento de esgotos requer uma sistemática e controle bem definidos e eficientes, visando evitar que estas venham a sair da área de tratamento e atinjam corpos d'água. Entretanto, o simples manejo interno não garante que essas plantas venham a ser disseminadas no meio ambiente de forma natural, por exemplo, através de pássaros que se alimentam delas e que podem acabar voando para outros ambientes e espalhar sementes. O sucesso com o qual essas plantas irão se desenvolver nos habitats dependerá de variáveis químicas,

radiação solar, velocidade da água, exposição ao vento e a competição e herbivoria – entre outros fatores citados por Thomaz (2001).

Thomaz (2001) resume as alternativas de manejo conforme a Tabela 4.

**Tabela 4.** Métodos utilizados no manejo e controle de macrófitas aquáticas.

Métodos	Exemplos
Físicos/ mecânicos	Remoção manual, manipulação dos níveis de água, controle da vazão, uso de dragas, aumento da turbidez da água e cobertura do sedimento com diversos tipos de materiais.
Químicos	Herbicidas
Biológicos	Utilização de predadores (peixes e insetos), competidores, parasitas e substâncias alelopáticas

Fonte: PIETERSE e MURPHY (1990 apud THOMAZ, 2001)

De modo geral os métodos físicos e mecânicos seriam os que menos interferência causariam no ambiente aquático. Entretanto, conforme muitos autores, o desafio permanece quanto a disposição dos resíduos retirados. A remoção manual é citada como sendo um sucesso em praias do reservatório de Itaipu. Já o método químico pode trazer prejuízos ao ecossistema interno e se alastrar para fora do local, no caso em questão, através do efluente final. Já o controle biológico pode empregar desde fungos e insetos até peixes, com o devido cuidado por se tratarem em geral de espécies exóticas que podem gerar outros impactos ambientais (THOMAZ, 2001).

Do levantamento apresentado na Tabela 4 constata-se que faz parte da temática de vários pesquisadores definições ou diretrizes para destinação das lemnas retiradas durante o manejo. Constatam-se também os altos resultados de eficiência de remoção por essas macrófitas, na grande maioria dos trabalhos.

## 2.7 Lagoas de estabilização

Conforme Von Sperling (2009), a lagoa facultativa é a configuração mais simples entre as lagoas de estabilização. O processo se dá pelo tempo de retenção hidráulico, que propicia que os processos biológicos ocorram da seguinte forma: o esgoto bruto entra por uma extremidade e sai pela outra, fazendo um percurso

que leva vários dias (Tempo de Detenção Hidráulica – TDH). Durante esse percurso observa-se a formação de três compartimentos: uma zona com característica anaeróbia (baixa concentração de oxigênio dissolvido – OD), zona aeróbia e zona facultativa (misto dos dois). Uma parte da matéria orgânica sedimenta-se formando o lodo que será retirado de tempos em tempos, conforme necessário. No fundo, onde está esse lodo, forma-se a zona anaeróbia. O lodo ainda passa por processos naturais que resultarão na liberação de gases (metano, carbônico e outros) e água, restando em maior quantidade a fração não biodegradável. A matéria orgânica dissolvida e a matéria particulada finamente e que não sedimenta tende a ser oxidada por ação de microrganismos aeróbios presentes na camada superior e intersticial (zona aerada e facultativa). A zona aerada é formada não apenas pela troca de gás oxigênio presente no ar com a zona superficial mais próxima (naturalmente, através de ventos ou outros), mas principalmente devido a presença de algas que realizam fotossíntese. As condições ambientais influenciam fortemente na eficiência desse sistema, sendo elas a incidência de radiação solar, os ventos e a temperatura.

Há diversos tipos de lagoas. Na Tabela 5 são apresentados os principais parâmetros de projeto para os sistemas mais simples, sem adição de equipamentos para forçar a remoção, como aeradores.

Na Figura 8 é possível verificar o sistema de tratamento do Bairro de Recreio, Charqueada, SP. O sistema conta com tratamento primário ou preliminar para a remoção dos sólidos mais grosseiros e areia e de uma lagoa do tipo facultativa. O esgoto atravessa a lagoa de um extremo ao outro, que possui o formato de uma ferradura.



**Figura 8.** Lagoa Recreio onde foram realizados os testes desta dissertação. a - Vista geral, b – Local do sistema de tratamento. Fonte: Google Maps.

O dimensionamento de um projeto de lagoas de estabilização deve levar em conta vários parâmetros; um exemplo pode ser observado na Tabela 5 adaptada de Von Sperling (2009).

**Tabela 5.** Principais parâmetros de projeto de lagoas de estabilização.

Parâmetro de projeto	Lagoa			
	Anaeróbia	Facultativa	Decantação	Maturação
Tempo de detenção Hidráulico (TDH) (dias)	3 – 6	15 – 45	~2	Depende do projeto
Taxa de aplicação superficial (kg DBO5 ha d <sup>-1</sup> )	-	130 – 350	-	-
Profundidade (H) (m)	3 – 5	1,5 - 2,0	3 – 4	0,8 - 1,2
Relação comprimento/largura (L B <sup>-1</sup> )	1 – 3	2 a 4	-	Depende do projeto
Coef. K rem. DBO (mistura completa, 20°C, d <sup>-1</sup> )	-	0,25 - 0,40	-	-
Coef. Temperatura <sup>θ</sup> (mistura completa)	-	1,05 - 1,085	-	-
Taxa de acúmulo de lodo (m <sup>3</sup> hab ano <sup>-1</sup> )	0,01 - 0,04	0,03 - 0,08	-	-

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2009).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Dados do sistema**

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) possui algumas estações de tratamento de esgotos que operam a partir de lagoas na Bacia Hidrográfica do Sorocaba e Médio Tietê. Foi escolhida a ETE Recreio, localizada no bairro de Recreio, Charqueada, SP.

A ETE Recreio possui certificação ISO 14001, e faz parte do programa de aprimoramento das práticas de gestão operacional e ambiental da SABESP, onde investimentos da ordem de R\$ 21,5 milhões desde 2009 vem proporcionando uma maturidade aos gestores e operadores dos sistemas de água e esgoto com vistas aos exigentes requisitos necessários para o atendimento as leis ambientais brasileiras, além de busca por melhores e mais adequadas infraestruturas das estações, maior segurança operacional, mitigação/minimização dos riscos, acidentes e da geração de passivos ambientais, além de estímulo ao desenvolvimento de ações preventivas (SABESP, 2013).

Além da operação e manutenção diária, esse sistema possui um intenso programa de monitoramento de qualidade e auditorias por órgãos externos e ambientais.

A área de estudo envolve os bairros Santa Luzia, Recreio e Jardim São Paulo no município de Charqueada, localizado na região Centro Oeste do Estado de S. Paulo, distante cerca de 180 km da capital. O município de Charqueada

limita-se com os municípios de Piracicaba, Rio Claro, Ipeúna, Itirapina e São Pedro, sua localização geográfica é 22° 31' 30" de latitude S e 47° 47' 46" de longitude W.

Para atingir o local a partir da capital, um dos principais roteiros é o seguinte: Rodovia SP-330 (Anhanguera) ou Rodovia SP-332 (dos Bandeirantes), daí até o trevo com a Rodovia SP-135 (Santa Bárbara D' Oeste-Piracicaba), desta até a cidade de Piracicaba, onde se inicia a Rodovia SP-308 (Piracicaba-Charqueada) e percorrendo esta última em cerca de 22 km até o Município de Charqueada. O acesso rodoviário para os bairros Santa Luzia, Recreio e Jardim São Paulo é feito pela Rodovia Piracicaba-Charqueada (SP-308), distando cerca de 10 km da sede.

O Município de Charqueada possui uma área total de 176 km<sup>2</sup>. Os bairros Santa Luzia, Recreio e Jardim São Paulo apresentam topografia ligeiramente acidentada, com variação altimétrica entre as cotas 495 m e 540 m e localizam-se na bacia do córrego Ressaca afluente do Rio Corumbataí.

A Estação de Tratamento de Esgotos é composta das unidades de pré-tratamento e de uma Lagoa Facultativa secundária, a qual foi dimensionada para atender a população urbana dos bairros Santa Luzia, Recreio e Jardim S. Paulo prevista para final de plano:

- População (2.022): 3.496 habitantes;
- Vazão média de esgoto (2.002): 5,65 L s<sup>-1</sup>;
- Vazão média de esgoto (2.022): 8,82 L s<sup>-1</sup>;
- Carga Orgânica (2.022): 189 kg DBO dia<sup>-1</sup>;
- Sólidos em suspensão: 200 mg L<sup>-1</sup>.

Optou-se por essa solução por tratar-se de uma alternativa extremamente simples para construção que exige operação mínima, sem qualquer necessidade de se contratar operadores especializados. O processo se desenrola como em grandes fossas sépticas, onde a matéria orgânica em suspensão se deposita no fundo da unidade, entrando posteriormente, em digestão anaeróbia, exalando certo odor. Por esses motivos deve estar geralmente localizado distante dos centros habitacionais, cerca de 500 metros.

O efluente de Lagoas de Estabilização/Facultativas apresenta uma eficiência de redução de DBO da ordem de 80-90%.

### 3.2 Características urbanas e socioeconômica da comunidade

A base econômica relaciona-se à agricultura, sobretudo da cana-de-açúcar, e agroindústria. Os usos do solo compreendem a policultura (cana de açúcar, milho, mandioca e arroz, com altas taxas de aplicação de agroquímicos, com exceção das culturas do milho e a mandioca). No Município, predominam as atividades agrícolas e rurais, com amplas áreas de pastagens para criação de gado.

### 3.3 Hidrografia da Área de Projeto

O município de Charqueada e os bairros Santa Luzia, Recreio e Jardim São Paulo estão situados na bacia hidrográfica do rio Corumbataí, que é afluente do rio Piracicaba. O Município localiza-se na área da Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHI) nº 05 – Piracicaba.

### 3.4 Sistema de Esgotos Sanitários

O Sistema de Esgotos Sanitários é dotado de Rede Coletora, Interceptor, Emissário e Estação Elevatória. O Sistema de Esgotos Sanitários dos bairros Santa Luzia, Recreio e Jardim São Paulo é dotado basicamente de: redes coletoras, emissários, uma estação elevatória de esgotos e uma linha de recalque, sendo seus efluentes lançados após tratamento no Córrego Ressaca e Rio Corumbataí. O sistema de esgotos contém 346 ligações. A evolução do aumento estimado de consumo (projetada) quando foi realizado o projeto e é apresentada na Tabela 6.

**Tabela 6.** Evolução do consumo per capita projetado para a ETE Recreio.

Município/Comunidade	2002	2007	2012	2017	2022
	L/hab dia <sup>-1</sup>				
Santa Luzia	109	115	120	125	130
Recreio	105	112	118	124	130

### 3.5 Carga Orgânica

Nos bairros não há nenhum grande contribuinte de carga orgânica a ser considerado separadamente. Assim sendo, na época do projeto foi considerada apenas a carga orgânica proveniente de atividades domésticas, conforme apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7.** Carga orgânica de projeto.

Ano	População Atendida	Carga Orgânica
	Hab	kg DBO dia <sup>-1</sup>
2.002	2.42	130,68
2.022	3.496	188,78

### 3.6 Dimensionamento da Lagoa facultativa

O Tratamento de Esgotos é feito basicamente através de uma Lagoa Facultativa secundária, a qual tem as seguintes características finais de dimensionamento adotadas:

- número de unidades (n): 1 un;
- profundidade da lagoa - lâmina (h) : 2 m
- comprimento - meia profundidade (Lmp): 278 m;
- largura - meia profundidade (Bmp): 36 m;
- área da lagoa à meia seção (Al/2): 9.490 m<sup>2</sup>;
- tempo de detenção (Td): 22,24 dias;
- produção “per capita” de lodo”: 0,04 m<sup>3</sup> hab ano<sup>-1</sup>;
- acúmulo anual de lodo: 140 m<sup>3</sup>
- espessura anual da camada de lodo: 0,016 m
- eficiência da lagoa facultativa secundária (E): 80 a 90 %;

### 3.7 Espécie utilizada

Para a seleção da espécie a ser utilizada na lagoa para o tratamento e valorização dos dejetos observaram-se alguns pré-requisitos, de acordo com os objetivos propostos, sendo eles:

- Presença da espécie na ETE;
- Adaptabilidade ao efluente e ao sistema implantado.

No caso, uma macrófita aquática do grupo lemna encontrava-se instalada na ETE Recreio praticamente desde os primeiros meses após a entrada em operação, conforme relatos dos responsáveis pela operação desse sistema, ou seja, desde 2008. Como se observa a presença de muitos patos na lagoa, que se alimentam e vivem

por ali, além de se reproduzirem, acredita-se que os mesmos tenham sido os responsáveis pela aparição dessa espécie.

A espécie utilizada neste trabalho foi *Lemna minor*.

### **3.8 Delineamento experimental**

O experimento se deu em duas etapas:

Etapa 1:

- Remoção da massa de Lemnaceae da superfície da ETE em junho de 2015;
- Monitoramento das principais variáveis de qualidade com frequência diária, por 15 dias consecutivos (18/06/15 e 02/07/2015);
- Análise da massa seca de amostras coletadas ao longo desse período;
- Biometria das Lemnaceae.

Etapa 2:

- Remoção da massa de Lemnaceae da superfície da ETE em novembro de 2015;
- Monitoramento das principais variáveis de qualidade com frequência diária a 3x semana, por 30 dias consecutivos;

### **3.9 Monitoramento**

A eficiência do sistema de tratamento na ETE Recreio foi avaliado através de amostragem de vários pontos na primeira etapa (4 pontos: a - entrada, b - meio da primeira seção, c - meio da segunda seção e d - saída ou efluente final (Figura 9);



**Figura 9.** Pontos de monitoramento da etapa 1. (1- Afluente ou entrada da ETE; 2 - Meio da primeira seção; 3 – Meio da segunda seção; 4 – Saída ou efluente tratado).

As variáveis avaliadas são descritas na Tabela 8.

**Tabela 8.** Local de amostragem e parâmetros avaliados nas duas etapas do experimento.

Ponto	Etapas 1 e 2
Entrada	DBO, fósforo total, amônia, pH, cor, turbidez, série de sólidos, temperatura
Meio da primeira seção	OD, temperatura
Meio da segunda seção	OD, temperatura
Saída	DBO, fósforo total, amônia, pH, cor, turbidez, série de sólidos, temperatura

Foram obtidas informações das variáveis ambientais radiação solar, pluviometria e ventos através dos dados registrados por estação meteorológica da ESALQ - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

Todas as coletas foram realizadas no período da manhã, entre 9h00 e 11h00.

Também foi avaliada, na segunda etapa, a radiação solar (anexo 1) além de um acompanhamento do desenvolvimento das lemnas através de registros fotográficos.

As análises físico-químicas foram conduzidas pelo laboratório da SABESP o qual possui acreditação em análises pela gestão ISO 17025:05. Os métodos analíticos seguiram as metodologias encontradas no Standard Methods of Examination of Water and Wasterwater, métodos 4500-H+B,

Respirométrico/SMEWW-5210D, Colorimétrico Refluxo fechado/SMEWW – 5220, D, Azida Modificada/SMEWW-4500-OC, Cone Imhoff/SMEWW-2540 F, Eletrométrico/SMEWW-4500-OG, SMEWW-4500 P e E.

### 3.10 Detalhamento das ações em cada etapa

Para comparação com os resultados levantados neste projeto de pesquisa, foram utilizados resultados de monitoramento realizados pela SABESP, ao longo dos anos de 2008 a 2014, com frequência bimestral. Os parâmetros analisados seguiram as mesmas metodologias das utilizadas neste trabalho, e também foram realizados pelo laboratório da SABESP.

#### Etapa 1

Dos dias 14 a 17/06/15 foi realizada a retirada das lemnas, utilizando um anteparo formado por garrafas tipo pet, apenas com ar no seu interior e amarradas com corda plástica umas as outras, trazidas próximo a borda do tanque, as lemnas eram retiradas com arco tendo uma tela plástica de malha 1 mm (Figura 10).



**Figura 10.** Tanque contendo lemnas, as quais foram arrastadas até a borda do tanque e removidas com tela. Fonte: acervo pessoal.

Após a retirada das lemnas, não foi necessário período de adaptação, pois as lemnas já se encontravam instaladas no sistema há alguns anos. Apenas foi realizado o manejo.



**Figura 11.** Vista da lagoa após a retirada das lemnas.



**Figura 12.** Detalhe da lagoa.



**Figura 13.** Detalhe da lagoa.



**Figura 14.** Detalhe da lagoa, no dia 29 de junho de 2015. Fonte: acervo pessoal.



**Figura 15.** Detalhe da lagoa, no dia 29 de junho de 2015. Fonte: acervo pessoal.



**Figura 16.** Detalhe da lagoa, no dia 30 de junho de 2015. Fonte: acervo pessoal.



**Figura 17.** Detalhe da lagoa, no dia 30 de junho de 2015.

### **Etapa 2**

Foi realizada limpeza da mesma forma explicada para a Etapa 1, com retirada total das lemnas e o início do monitoramento da etapa 2 a partir do dia 07/12/15, e por 30 dias consecutivos sem novo manejo, ou seja, sem nova limpeza ou retirada de lemnas. O acompanhamento do desenvolvimento das mesmas pode ser feito através das figuras a seguir.



**Figura 18.** Detalhe da lagoa aos 3 dias após o início da Etapa 2 (10 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 19.** Detalhe da lagoa aos 3 dias após o início da Etapa 2 (10 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 20.** Detalhe da lagoa aos 4 dias após o início da Etapa 2 (11 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 21.** Detalhe da lagoa aos 4 dias após o início da Etapa 2 (11 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 22.** Detalhe da lagoa aos 7 dias após o início da Etapa 2 (14 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 23.** Detalhe da lagoa aos 7 dias após o início da Etapa 2 (14 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 24.** Detalhe da lagoa aos 8 dias após o início da Etapa 2 (15 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 25.** Detalhe da lagoa aos 8 dias após o início da Etapa 2 (15 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 26.** Detalhe da lagoa aos 9 dias após o início da Etapa 2 (16 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 27.** Detalhe da lagoa aos 9 dias após o início da Etapa 2 (16 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 28.** Detalhe da lagoa aos 10 dias após o início da Etapa 2 (17 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 29.** Detalhe da lagoa aos 14 dias após o início da Etapa 2 (21 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.



**Figura 30.** Detalhe da lagoa aos 14 dias após o início da Etapa 2 (21 de dezembro de 2015). Fonte: acervo pessoal.

### **3.11 Metodologia de análise de viabilidade econômica e financeira**

Para o estudo de viabilidade foi utilizada a técnica do valor presente líquido (VPL), também conhecido como valor atual líquido (VAL) ou método do valor atual, é a fórmula matemático-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial. Para os cenários propostos foi obtida informação sobre valor de

referência para aquisição e montagem de uma estação de tratamento de esgotos sanitários com capacidade similar a deste estudo, informada pela SABESP, Pregão Eletrônico Processo: 13/013.171 N° 51174/13. Para o estudo de caso com adição de processo, foi utilizada metodologia descrita em USEPA (2013).

### **3.12 Estimativa para cálculo da massa de lemnas**

Foi considerado como referência informações obtidas em MOHEDANO (2010).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão dos resultados a seguir será focado na comparação entre os pontos 1 a 4, considerando suas representatividades em relação aos resultados, especialmente com foco na operação do sistema. Portanto, o ponto 1 que representa o esgoto bruto ou afluente do tratamento pode não aparecer, a não ser e principalmente por se tratar de uma referência para avaliação da remoção final, no ponto 4 (saída do tratamento ou efluente).

### 4.1 Etapa 1

As determinações observadas nos 4 pontos da lagoa são apresentadas na Tabela 9.

A temperatura dentro da lagoa variou no período de 18,2 °C a 24,9 °C; a temperatura média do ar variou de 15,7 °C a 22,6 °C, com temperatura máxima diária de até 30,3 °C e a mínima de até 7,9 °C no período. De acordo com os dados do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas a agricultura (CEPAGRI) da Unicamp, a temperatura esperada para o mesmo período seria de 11,3 °C a 24,9 °C, e média de 18,1 °C, o que indica que ocorreu um inverno atípico, com maior variação de temperatura, e em média mais quente. Todas estas medidas ocorreram no período da manhã, após as 9h30.

A velocidade do vento variou entre: 0,3 m s<sup>-1</sup> a 10,0 m s<sup>-1</sup>. A chuva ocorreram apenas nos dois últimos dias do experimento.

A OD variou de 0,18 a 0,72 mg L<sup>-1</sup>, o pH de 6,13 a 7,56 e a concentração de fósforo total na massa seca do tecido vegetal, variou entre 9,94 a 13,86 mg kg<sup>-1</sup>.

Concentração de PT: máx = 9,9 mg L<sup>-1</sup> e mín= 5,8 mg L<sup>-1</sup>; amônia: máx = 70,0 mg L<sup>-1</sup> e 25,4 mg L<sup>-1</sup> no esgoto bruto.

Nesta etapa constatou-se ausência de dípteros e de maus odores.

**Tabela 9.** Variação da temperatura, OD, pH, PT e amônia das amostras coletadas na lagoa recreio, durante a primeira etapa.

Data	T				OD				pH				PT	Amônia
	Pontos de observação				Pontos de observação				Pontos de observação					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
	----- °C -----				----- mg L <sup>-1</sup> -----				-----				----- % -----	
18-jun	24,0	21,9	21,7	22,6	-	0,23	0,23	0,46	7,03	7,17	7,15	7,04	82	77
19-jun	22,7	18,4	20,2	19,8	-	0,24	0,38	0,27	7,15	7,11	7,14	7,19	78	77
20-jun	23,9	20,7	20,4	19,3	-	0,21	0,28	0,36	7,08	7,14	7,15	7,1	81	76
21-jun	24,1	19,4	19,4	21,7	-	0,23	0,35	0,38	7,23	7,14	7,2	7,26	83	78
22-jun	24,9	20,9	20,3	21,7	-	0,25	0,26	0,45	7,29	7,19	7,22	7,29	81	79
23-jun	24,7	20,8	21,2	23,3	-	0,3	0,33	0,47	7,08	7,25	7,34	7,34	75	72
24-jun	19,9	19,7	19,5	18,7	-	0,28	0,27	0,32	6,13	7,37	7,38	7,17	76	72
25-jun	18,2	19,9	19,7	19,8	-	0,27	0,28	0,41	7,03	7,23	7,28	7,33	76	81
26-jun	22,1	19,7	19,4	20,3	-	0,26	0,18	0,43	7,05	7,26	7,27	7,39	84	83
27-jun	21,9	19,9	19,6	20,1	-	0,34	0,25	0,3	7,04	7,33	7,37	7,46	74	75
28-jun	21,6	19,6	19,4	19,9	-	0,31	0,28	0,32	7,24	7,3	7,46	7,4	66	65
29-jun	24,2	18,3	20,3	21,4	-	0,3	0,3	0,35	7,14	7,39	7,49	7,39	73	75
30-jun	23,7	19,7	19,1	19,3	-	0,26	0,72	0,25	7,16	7,39	7,55	7,5	83	77
1-jul	21,3	19,5	19,2	18,7	-	0,29	0,64	0,28	7,29	7,19	7,22	7,29	73	64
2-jul	22,3	19,3	19,5	19,5	-	0,21	0,26	0,32	7,00	7,45	7,55	7,56	79	67
Média	22,6	19,8	19,9	20,4		0,3	0,3	0,4	7,1	7,3	7,3	7,3	78	75

A seguir serão tratados os principais parâmetros analisados no sistema da ETE Recreio, de forma individual, e para os pontos que permitem avaliar uma variação importante e representativa para a presente pesquisa.

#### *Oxigênio Dissolvido (OD) – Etapa 1*

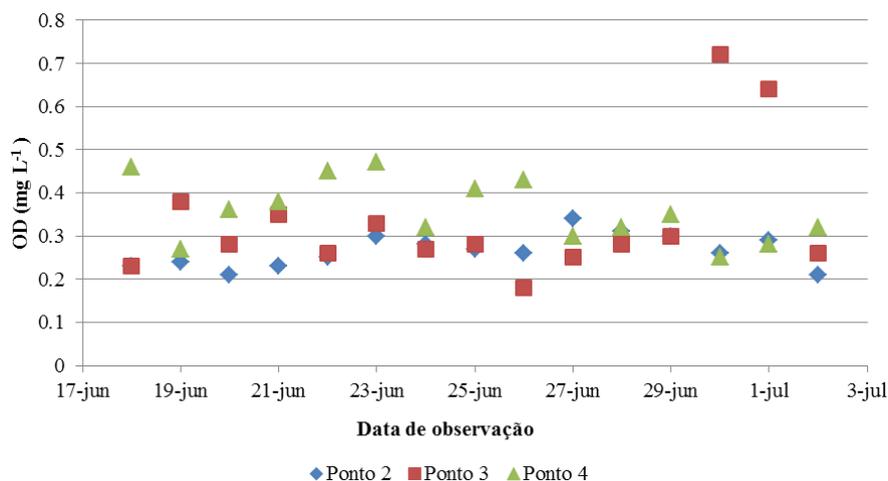
As concentrações de OD aumentaram ao longo do encaminhamento dos esgotos para o fim do processo de tratamento, o que pode ser observado na comparação do ponto 2 para o ponto 4 em quase todas as épocas

avaliadas. Mesmo havendo estas variações, as concentrações permaneceram em valores relativamente baixos. Mohedano (2010) faz uma revisão ampla sobre a ocorrência de OD em lagoas com lemnas onde informa que há divergência entre os autores quanto as concentrações encontradas, mas em geral reconhece-se a influências das algas nas concentrações superficiais. Alguns estudos citados indicam altas concentrações de OD através da incorporação variando entre 3 a 4 g m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

Foi observada durante a pesquisa a presença de peixes na lagoa da ETE Recreio, que subiam até a superfície para consumir possivelmente essas macrófitas. Da mesma forma, a presença de pequenos patos que mergulham nessa lagoa para consumir os peixes, assim como patos comuns que consomem, aparentemente, as macrófitas. Essas observações dão a atender que há condições de sobrevivência instalada, como concentração de OD, ao longo do período diurno e noturno.

Em ocasiões onde há intensa mortandade das lemnas, por falta de remoção, estudos registraram concentrações de OD de até 10 mg L<sup>-1</sup>, as quais foram relacionadas com a presença de devido à altíssima concentração de algas segundo MOHEDANO (2010). Conforme já comentado em capítulos anteriores, as algas aumentam a concentração do oxigênio dissolvido na superfície das lagoas através da fotossíntese, chegando a ultrapassar os valores tipicamente encontrados em ambientes aquáticos (VON SPERLING, 2009). Zugman (1982) informa que a atividade fotossintética das algas ocorre durante o período diurno, gerando uma supersaturação de OD, o que explicaria as altas concentrações percebidas na lagoa da ETE Recreio; e ainda faz menção a interação de bactérias e algas com as espécies químicas encontradas, e o consumo do CO<sub>2</sub> propicia a alteração da relação ácido-base no meio. Essas alterações associadas à presença de amônia e seu consumo podem ter influenciado, também, nas concentrações de pH. Portanto, constata-se que a lagoa apresenta um ecossistema particular, definido a partir de várias interações entre diferentes espécies.

Nesta Etapa 1 a dispersão dos valores das amostras coletadas foi muito menor que a encontrada na Etapa 2. Na Figura 31 são apresentados os valores de OD ao longo das amostragens coletadas nos 3 pontos.



**Figura 31.** Oxigênio Dissolvido (OD) nas amostras coletadas em 3 pontos da lagoa com lemnas, ao longo do período de amostragem.

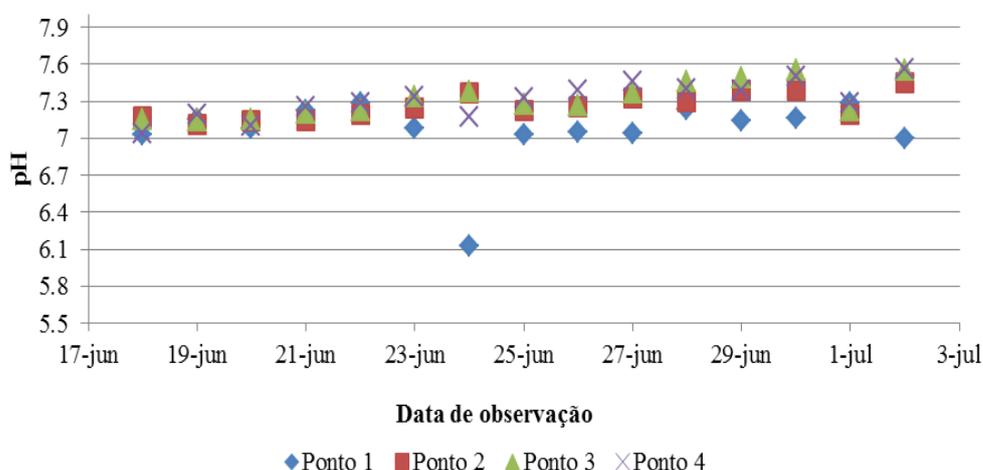
#### *Potencial hidrogenionico (pH) – Etapa 1*

A variação do pH na Etapa 1 pode ser observada na Figura 32, onde se constata uma discreta elevação ao longo do período amostrado, e completamente divergente do que foi observado na Etapa 2. A variação de pH em um ambiente como esse pode ocorrer, segundo Mohedano (2010), em casos de baixa densidade de lemnas e conseqüentemente baixa cobertura da superfície, dando condições de penetração da radiação solar na coluna d'água e desenvolvimento de algas. As algas, devido ao processo de absorção do CO<sub>2</sub> do meio geram o aumento do pH, a liberação da amônia na forma iônica a qual é tóxica para lemnas.

Considerando os registros fotográficos nas Figuras 10 a 17 nota-se que após a retirada das lemnas propiciou-se a abertura de clareiras, esse resultado difere da avaliação de Mohedano (2010), ou seja, não houve variação de pH mesmo com as lemnas ainda não plenamente estabelecidas no início do monitoramento e após a remoção. A causa para esse resultado, conforme será exposto mais adiante, deve-se à baixa radiação típica do período analisado, ou seja, inverno.

Não se registrou aumento significativo do OD, o que confirma a hipótese de que as algas não tiveram condições propícias ao desenvolvimento, enquanto que na Etapa 2 a ser discutida mais adiante o cenário é completamente inverso. As fotos apresentadas no capítulo anterior permitem constatar as observações de campos, também comentadas por Mohedano (2010), e difíceis de mensurar, que é a evolução do

crescimento dessas macrófitas em espaços muito grandes – diferente de controles de bancada que permitem um controle mais apurado em termos de massa e crescimento. O que pode se concluir através dos registros fotográficos da área da lagoa é a importante influencia dos ventos no arraste da massa e com potencial ação para sobreposição, ocasionando perda da massa. A ação dos ventos e abertura de clareiras também influencia negativamente porque permite que algas passem a se desenvolver e competir, além de potencialmente transformarem o ambiente para condições tóxicas para as lemnas, com o aumento do pH e da fração de amônia. O arraste pelos ventos também propiciava um amontoamento das lemnas em cantos do talude da lagoa, e alta mortalidade.



**Figura 32.** Dispersão do pH ao longo do espaço e do tempo na lagoa com lemnas.

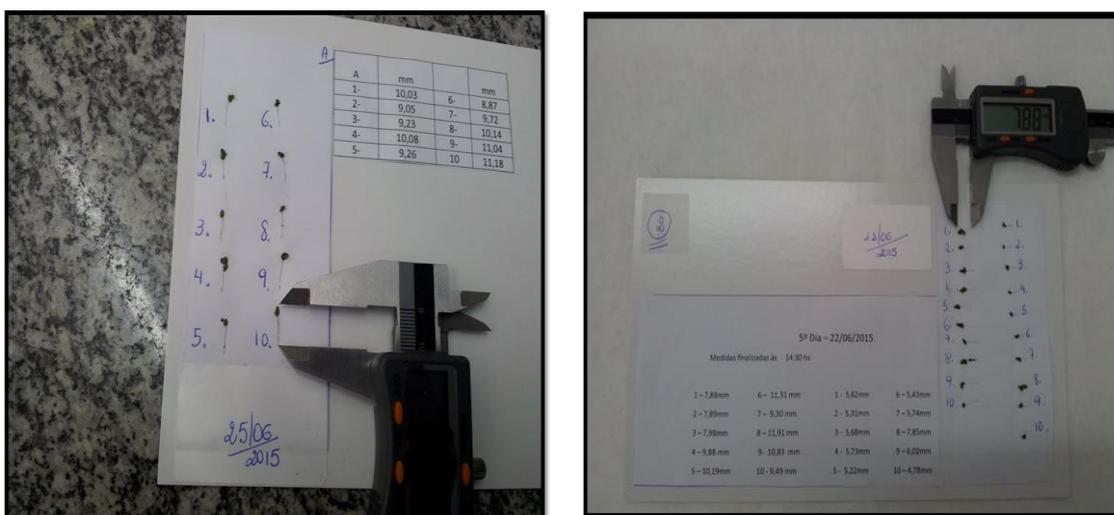
#### *Análise de fósforo na massa de lemnas*

Cerca de 500 g do material vegetais foram coletadas em dias alternados e encaminhadas ao Laboratório de análises químicas, da Agrilab Laboratório de análises agrícolas e ambientais Ltda. Nestas amostras foram determinadas a massa fresca e a seca a 60 °C, o que ocorreu em estufa de circulação forçada de ar.

Após o material encontrar-se seco, o mesmo foi novamente pesado, e seguindo metodologia utilizando o reagente metavanadato, foi determinada a concentração de fósforo na amostra.

Em relatório feito por Lima et al., (2003), verifica-se que um cultivo de *Lemnas minor* com dejetos de aves atingiu concentrações médias de 1,48 g de P kg<sup>-1</sup>, quase que 10 vezes menores que as encontradas nas amostras da ETE Recreio.

A caracterização biométrica das plantas também foi realizado para avaliação da variação de tamanhos dos indivíduos (Figura 33). Eram recolhidas amostras de cerca de 50 gramas de plantas, sendo removidas dessa amostra de 10 a 20 indivíduos, que eram avaliados quanto ao seu tamanho (Tabela 10).



**Figura 33.** Avaliação biométrica da lemna.

A variação de tamanhos foi bem significativa, e os resultados médios para as datas de amostragem variaram de 10,76 mm (19/06) para 6,4 mm (29/06). Portanto, observa-se um decréscimo de tamanho ao longo do período. Não foi possível encontrar na literatura informações que pudessem relacionar diretamente esse evento. Entretanto, infere-se que a diminuição do tamanho entre o 2º e o 12º dias deve-se a uma nova geração de lemnas formada neste período. No entanto, outros fatores podem estar influenciando no tamanho, tais como a toxicidade, diminuição da concentração de nutrientes na lagoa, provavelmente devido ao aumento da absorção dos mesmos pela nova massa de plantas que estava se formando. Outra hipótese seria mortalidade precoce de lemnas por conta da ação de ventos ou competição com outras espécies.

**Tabela 10.** Biometria das lemnas.

Data	Tamanho das Lemnas										Média
	Indivíduos										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Mm										
19/jun	10,7	10,7	10,7	9,4	13,2	11,0	10,0	10,1	10,6	11,3	10,8
22/jun	7,9	7,9	8,0	9,9	10,2	11,3	9,3	11,9	10,8	9,5	9,7
22/jun	5,8	5,3	5,7	5,7	5,2	5,4	5,7	7,9	6,0	4,8	5,8
25/jun	10,0	9,1	9,2	10,1	9,3	8,9	9,7	10,1	11,0	11,2	9,9
25/jun	7,4	5,2	6,4	6,5	7,3	5,6	7,5	4,3	4,5	6,8	6,1
29/jun	5,7	5,2	6,6	4,8	6,2	7,3	7,2	6,2	8,1	6,7	6,4

Em um artigo de Proença et al., (2012) as lemnas de controle em um teste de toxicidade variaram de tamanho indo de 9 mm até 16,75 mm em apenas 7 dias. Mohedano (2010), ao comparar o crescimento em duas lagoas com diferentes concentrações de nitrogênio amoniacal, relaciona a diferença de crescimento em relação ao teor de N. Entretanto, as medidas encontradas são muito superiores as do presente trabalho, variando entre  $21,5 \pm 9,1$  (na lagoa com maiores concentrações de  $N-NH_3$ ) e  $26,8 \pm 10,8$  mm (menor concentração de  $N-NH_3$ ). Porém, as concentrações de  $N-NH_3$  para Mohedano (2010) chegavam a ser 3 vezes superiores às encontradas na ETE Recreio.

Os resultados observados por Mohedano (2010) sugerem que as lemnas podem apresentar capacidade maior de crescimento do que as observadas neste trabalho, o que sugere que mais estudos devam ser realizados no sentido de entender os fatores que promovem este maior crescimento da planta e conseqüentemente a maior remoção de sais e outros componentes contidos na lagoa.

Um aspecto que deve ser destacado é que na lagoa da ETE Recreio, a capacidade de proliferação da planta foi muito rápida após a sua remoção, sendo que 100% da área da ETE foi preenchida com lemnas 30 dias após a remoção.

#### *Concentração dos nutrientes e outros parâmetros físico-químicos – Etapa 1*

Nas Tabelas 11 e 12 são apresentados resultados obtidos para os parâmetros analisados, na entrada (afluente) e saída da lagoa facultativa.

Na Tabela 13 é apresentado, baseado nas Tabelas 11 e 12, o cálculo das alterações de concentração dos parâmetros devido a remoção ocorrida na lagoa facultativa. Foram registradas remoções de até 84%, e todas acima de 72% para o fósforo total (média de 77%). A remoção para amônia também foi significativa, todas acima de 64% (média = 75%). Outros parâmetros também apresentaram elevada remoção. A DBO apresentou remoções acima de 64%, com média de 89% e todas as concentrações no efluente final abaixo de 60 mg L<sup>-1</sup>, ou seja, com pleno atendimento à legislação brasileira para efluentes de sistemas de tratamento de esgoto. O parâmetro SST, que se correlaciona com a DBO em suspensão, e principalmente com a presença de algas, apresentou também ótimas remoções, acima de 69%, com média de 85%.

Apesar de outros parâmetros terem sido analisados, não serão foco de avaliação já que não encontram referencia técnica com vistas ao tratamento e remoção de nutrientes em ETEs. Os resultados são apresentados para, quem sabe, subsidiar outros trabalhos e novas discussões técnicas.

**Tabela 11.** Afluente da ETE Recreio (esgoto bruto) para vários parâmetros.

Data	P <sub>total</sub>	Amônia	Cor	Turbidez	DBO	DQO	SS	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV
	----mg L <sup>-1</sup> ----		U.C	U.T	----- mg L <sup>-1</sup> -----								
18-jun	8,7	52,8	1587	232	280	541	4,0	848	408	440	405	150	255
19-jun	9,0	61,8	8586	287	380	944	4,5	838	400	438	380	110	270
20-jun	9,3	55,6	299,4	387	180	969	9,0	1036	456	580	520	145	375
21-jun	9,9	63,2	299,4	255	400	804	5,5	880	392	488	385	105	280
22-jun	8,6	66,6	5590	218	340	626	0,8	718	326	392	270	30	240
23-jun	7,6	50,4	6588	265	390	745	4,0	860	342	518	134	12	122
24-jun	7,8	49,8	9585	200	330	608	1,8	700	318	392	260	20	240
25-jun	9,0	70,0	6585	189	400	645	4,0	706	346	360	305	45	260
26-jun	9,3	52,6	3497	139	360	624	5,5	776	342	434	345	45	300
27-jun	8,5	36,0	1585	211	430	795	8,0	834	356	478	375	45	330
28-jun	5,8	25,4	302,5	398	130	243	3,5	428	250	178	170	75	95
29-jun	7,8	43,0	168,9	33,9	500	1034	5,0	820	382	438	305	60	245
30-jun	8,0	47,4	3258	155	170	383	1,1	676	322	354	210	35	175
1-jul	7,1	45,0	9523	171	270	534	3,0	692	326	366	255	20	235
2-jul	8,6	48,0	2581	315	44	889	5,5	862	370	492	420	90	330

DBO – Demanda Básica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; SS – Sólidos Solúveis; ST – Sólidos Totais; STF - Sólidos Totais Fixos; STV - Sólidos Totais Voláteis; SSF - Sólidos Suspensos Fixos; SSV - Sólidos Suspensos Voláteis.

**Tabela 12.** Efluente da ETE Recreio (efluente tratado) para vários parâmetros.

Data	P <sub>total</sub>	Amônia	Cor	Turbidez	DBO	DQO	SS	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV
	----mg L <sup>-1</sup> ----		U.C	U.T	----- mg L <sup>-1</sup> -----								
18-jun	1,6	11,9	111,2	71,9	22	154	0,20	340	200	140	50	0	50
19-jun	2,0	14,2	109,8	60,6	20	142	0,05	326	212	114	34	10	24
20-jun	1,8	13,5	111,2	47,7	16	117	0,05	312	196	116	18	0	18
21-jun	1,7	14,1	96,1	28,2	18	116	0,40	318	204	114	36	16	20
22-jun	1,6	14,0	95,5	28,3	18	104	0,05	304	198	106	34	6	28
23-jun	1,9	13,9	149,6	68,2	18	115	0,05	330	192	138	29	0	29
24-jun	1,9	13,8	110,7	56,5	16	108	0,05	326	208	118	42	10	32
25-jun	2,2	13,3	151,5	51,5	18	122	0,05	338	222	116	64	2	62
26-jun	1,5	8,83	128	36,7	24	113	0,05	316	220	96	30	2	28
27-jun	2,2	8,83	199,3	32,7	52	130	0,05	342	214	128	68	4	64
28-jun	2,0	8,87	170,6	33,8	38	115	0,05	356	240	116	52	8	44
29-jun	2,1	10,6	158,5	23,6	26	123	0,05	320	210	110	32	2	30
30-jun	1,4	10,8	151,7	23,7	22	117	0,05	372	218	154	36	0	36
1-jul	1,9	16,1	177,8	25,3	36	105	0,05	374	230	144	48	0	48
2-jul	1,8	15,7	184,5	39,3	16	119	0,05	346	212	134	38	2	36

DBO – Demanda Básica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; SS – Sólidos Solúveis; ST – Sólidos Totais; STF - Sólidos Totais Fixos; STV - Sólidos Totais Voláteis; SSF - Sólidos Suspensos Fixos; SSV - Sólidos Suspensos Voláteis; U.C – Unidade de Cor; U.T – Unidade de Turbidez.

**Tabela 13.** Eficiência de remoção para vários parâmetros avaliados comparando amostras coletadas na entrada da lagoa (esgoto bruto) e na saída (esgoto tratado).

Data	P <sub>total</sub>	Amônia	Cor	Turbidez	DBO	DQO	SS	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV
	----- % -----												
18-jun	82	77	93	69	92	72	95	60	51	68	88	100	80
19-jun	78	77	99	79	95	85	99	61	47	74	91	91	91
20-jun	81	76	63	88	91	88	99	70	57	80	97	100	95
21-jun	83	78	68	89	96	86	93	64	48	77	91	85	93
22-jun	81	79	98	87	95	83	94	58	39	73	87	80	88
23-jun	75	72	98	74	95	85	99	62	44	73	78	100	76
24-jun	76	72	99	72	95	82	97	53	35	70	84	50	87
25-jun	76	81	98	73	96	81	99	52	36	68	79	96	76
26-jun	84	83	96	74	93	82	99	59	36	78	91	96	91
27-jun	74	75	87	85	88	84	99	59	40	73	82	91	81
28-jun	66	65	44	92	71	53	99	17	4	35	69	89	54
29-jun	73	75	838	-596	95	88	99	61	45	75	90	97	88
30-jun	83	77	95	85	87	69	95	45	32	56	83	100	79
1-jul	73	64	98	85	87	80	98	46	29	61	81	100	80

2-jul	79	67	93	88	64	87	99	60	43	73	91	98	89
Média	77	75	80	36	89	80	98	55	39	69	85	91	83

DBO – Demanda Básica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; SS – Sólidos Solúveis; ST – Sólidos Totais; STF - Sólidos Totais Fixos; STV - Sólidos Totais Voláteis; SSF - Sólidos Suspensos Fixos; SSV - Sólidos Suspensos Voláteis; U.C – Unidade de Cor; U.T – Unidade de Turbidez.

Avaliando os resultados da Tabela 13 e removendo os valores “outliers” há uma alteração nos valores de remoção que são apresentados na Tabela 14.

Conforme os dados da Tabela 14 verifica-se que a remoção atingiu seu máximo no dia 26/06/15.

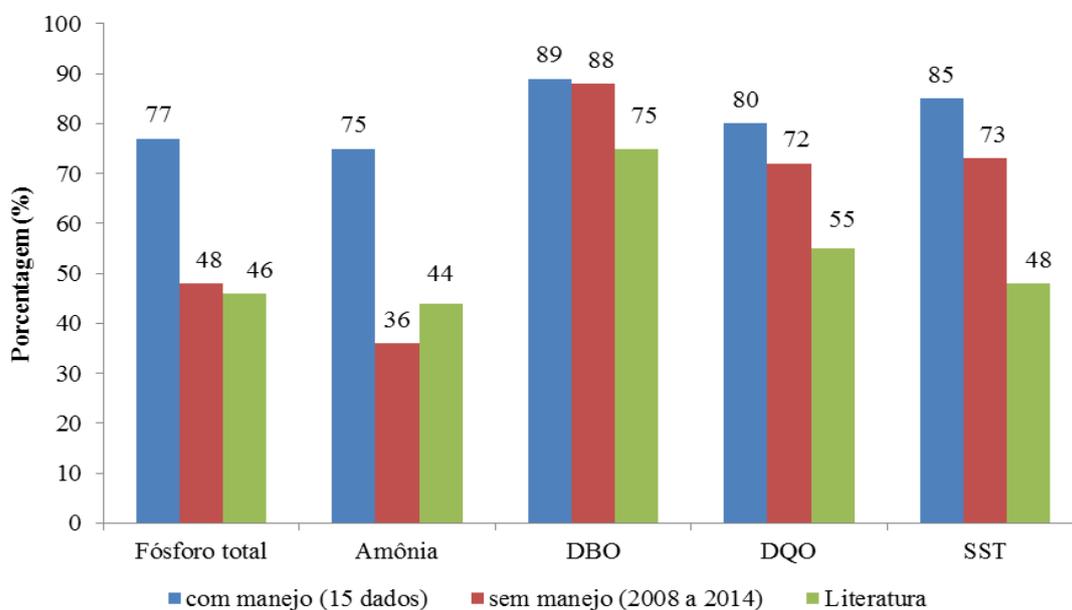
**Tabela 14.** Eficiência de remoção para os principais parâmetros de interesse, sem os “outliers”.

Data	P <sub>total</sub>	Amônia	DBO	DQO	SST	Média global
				----- % -----		
18-jun	82	77	92	72	88	82
19-jun	78	77	95	85	91	85
20-jun	81	76	91	88	97	86
21-jun	83	78	96	86	91	86
22-jun	81	79	95	83	87	85
23-jun	75	72	95	85	78	81
24-jun	76	72	95	82	84	82
25-jun	76	81	96	81	79	82
26-jun	84	83	93	82	91	87
27-jun	74	75	88	84	82	81
28-jun	66	65	71	53	69	65
29-jun	73	75	95	88	90	84
30-jun	83	77	87	69	83	80
1-jul	73	64	87	80	81	77
2-jul	79	67	64	87	91	78
Média	77	75	89	80	85	85

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; SST – Sólidos Suspensos Totais.

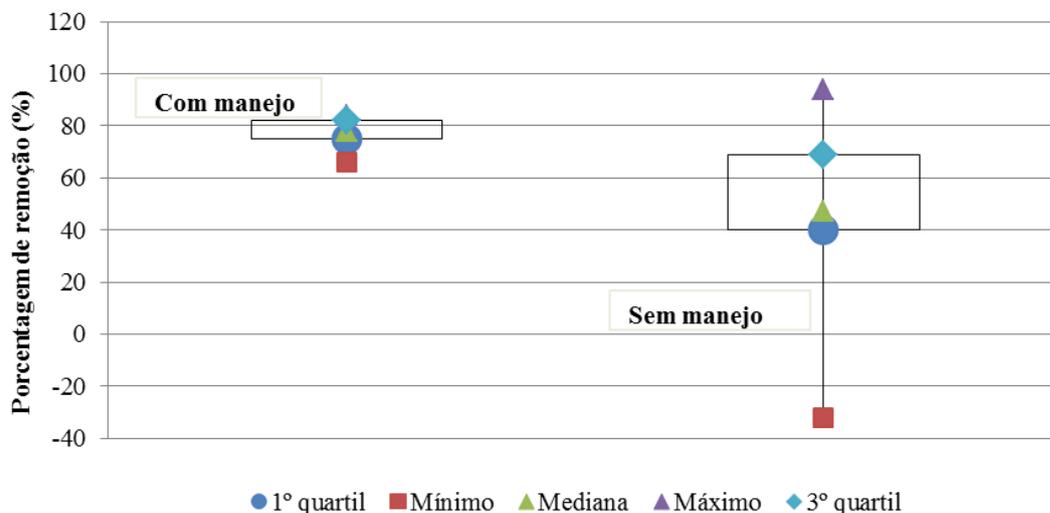
A Figura 34 apresenta a comparação (1) do histórico de 6 anos sem manejo da lagoa facultativa, mas com a presença de lemnas da Estação Recreio; (2) com o manejo realizado na primeira etapa deste experimento e; (3) as referencias da literatura para sistemas de lagoa de estabilização comum (OLIVEIRA e VON SPERLING, 2005). Nota-se que para todos os parâmetros apresentados o manejo

realizado gerou resultados superiores de remoção de P total, amônia, DBO, DQO e SST, portanto, melhorando a qualidade de água que sai do sistema. Consta-se que as eficiências de remoção são maiores para os parâmetros fósforo total, amônia e sólidos suspensos totais (SST).

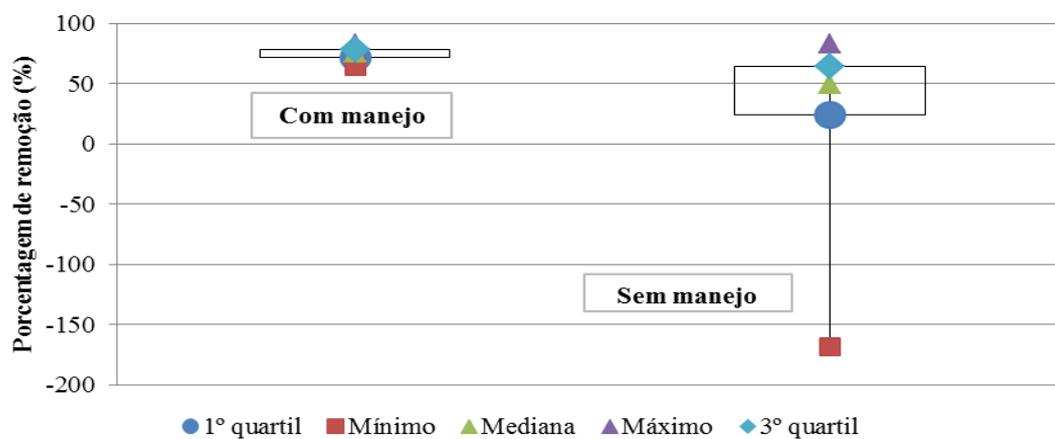


**Figura 34** – Resultados para vários parâmetros da lagoa facultativa de Recreio-Charqueada – SP comparados com dados da literatura.

As Figuras 35 e 36 apresentam uma análise estatística de dispersão dos resultados (gráfico box plot), onde se compara o período de dados com manejo e sem manejo na Lagoa da ETE Recreio. A estabilidade do processo é bem significativa em termos de eficiência de remoção no período onde ocorreu o manejo para os parâmetros fósforo total (PT) e amônia. No período sem manejo constata-se uma maior variabilidade de resultados de eficiência de remoção, chegando até a remoção negativa, provavelmente porque ao não ocorrer a retirada dessas macrófitas elas podem ter morrido e reciclado dentro da própria lagoa, liberando o fósforo absorvido.



**Figura 35.** Box plot dos resultados de remoção de fósforo total na lagoa facultativa de recreio, com dois manejos.



**Figura 36.** Box plot dos resultados de remoção de amônia na lagoa facultativa de recreio, com dois manejos.

Na tabela 15 são apresentados estudos de correlação dos parâmetros PT e amônia desta primeira etapa, com outras variáveis (Tabela 15). Nota-se que apenas o OD, no ponto 4, ou efluente final, apresentou significativa correlação com a temperatura.

**Tabela 15.** Correlação entre os parâmetros temperatura (T), pH, oxigênio dissolvido (OD), remoção de fósforo total (RPT) e remoção de amônia (RAM).

	T <sub>2</sub>	pH <sub>2</sub>	OD <sub>2</sub>	RPT <sub>2</sub>	RAM <sub>2</sub>
T <sub>2</sub>	1	-0,3	-0,37	0,29	0,17
pH <sub>2</sub>		1	0,33	-0,3	-0,3
OD <sub>2</sub>			1	-0,7	-0,3
RPT <sub>2</sub>				1	Nd
RAM <sub>2</sub>					1

	T <sub>3</sub>	pH <sub>3</sub>	OD <sub>3</sub>	RPT <sub>3</sub>	RAM <sub>3</sub>
T <sub>3</sub>	1	-0,4	-0,37	0,12	0,21
pH <sub>3</sub>		1	0,18	-0,3	-0,4
OD <sub>3</sub>			1	0,01	-0,3
RPT <sub>3</sub>				1	Nd
RAM <sub>3</sub>					1

	T <sub>4</sub>	pH <sub>4</sub>	OD <sub>4</sub>	RPT <sub>4</sub>	RAM <sub>4</sub>
T <sub>4</sub>	1	-0,17	0,76	0,17	0,3
pH <sub>4</sub>		1	-0,31	-0,2	-0,2
OD <sub>4</sub>			1	0,29	0,44
RPT <sub>4</sub>				1	Nd
RAM <sub>4</sub>					1

Pontos de monitoramento da etapa 1: 2 - Meio da primeira seção; 3 – Meio da segunda seção; 4 – Saída ou efluente tratado.

Não se verificou condições adversas para o desenvolvimento das lemnas nesta etapa de estudo. Segundo Mohedano, (2010) poderia ocorrer presença e predominância de algas e intoxicação das macrofilas por amônia. Tais problemas não ocorreram devido ao pH na lagoa, uma vez que o pH se manteve abaixo de 8, diminuindo com isso o potencial de volatilização, bem como um valor de OD adequado. O fato das remoções serem elevadas denota a capacidade ativa das lemnas, indicando, portanto, que o meio não afetou seu desenvolvimento.

## 4.2 Etapa 2

Na Etapa 2, as amostragens foram realizadas novamente nos 4 pontos da lagoa, sendo obtidos os seguintes resultados: a temperatura no período variou

de 23 °C a 35,7 °C na massa líquida; a temperatura média do ar ficou entre 24,4 e 29,1 °C, com temperatura máxima de 37,2 °C (Tabela 16). Os ventos não ultrapassaram os 1,2 m s<sup>-1</sup>. A pluviometria foi bem mais intensa que em junho/15, conforme será apresentado na Figura 46. O OD variou de 0,22 a 17,35 mg L<sup>-1</sup> e o pH variou de 6,61 a 9,24 no sistema como um todo, e no esgoto bruto, constatou-se pH entre 6,61 e 6,92. A concentração de PT: máx = 6,7 mg L<sup>-1</sup> e mín = 0,8 mg L<sup>-1</sup>; amônia: máx = 49,8 mg L<sup>-1</sup> e 4,74 mg L<sup>-1</sup> no esgoto bruto. Também se observou na lagoa ausência de dípteros e de maus odores.

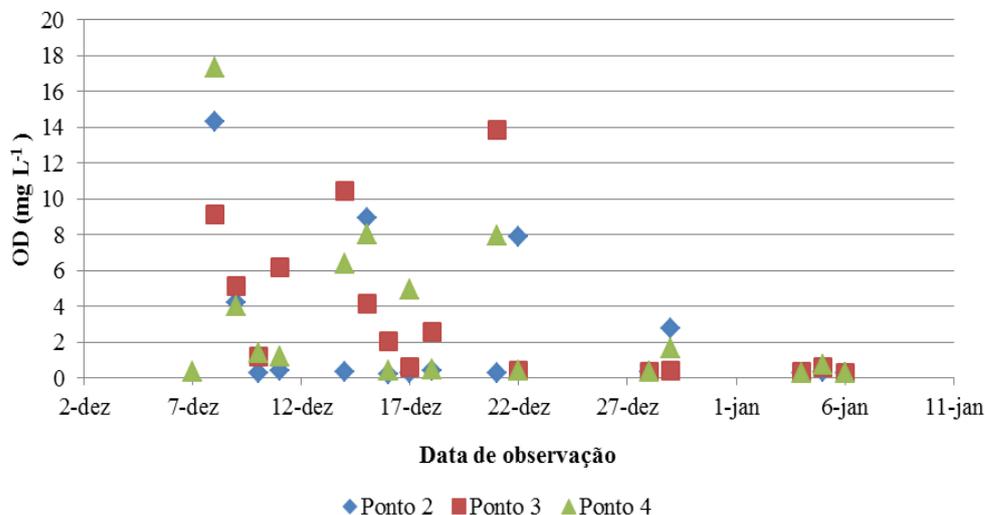
**Tabela 16.** Variação da temperatura, OD, pH, PT e amônia das amostras coletadas na lagoa recreio, durante a segunda etapa.

Data	T				OD				pH				PT	Amônia Remoção
	Pontos de observação				Pontos de observação				Pontos de observação					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
	----- °C -----				----- mg L <sup>-1</sup> -----				-----				---- % ----	
7-dez	-	-	-	-	-	-	-	0,33	6,9	-	-	8,18	50	-
8-dez	25,9	35,3	35,7	33,1	-	14,33	9,10	17,35	6,83	8,9	9,24	9,02	21	64
9-dez	26,2	28,6	29,0	28,8	-	4,24	5,16	4,00	6,81	8,01	7,77	7,93	70	75
10-dez	25,4	27,0	27,0	27,0	-	0,29	1,18	1,39	6,64	7,3	7,2	7,31	33	46
11-dez	26,1	27,3	29,3	29,2	-	0,4	6,20	1,18	6,85	7,11	7,75	7,53	66	70
14-dez	25,4	29,6	29,4	30,9	-	0,31	10,45	6,4	6,87	8,46	8,22	8,71	53	62
15-dez	25,7	29,0	29,1	29,3	-	8,96	4,17	8,04	6,73	8,35	8,1	8,39	63	81
16-dez	25,5	27,9	28,1	28,2	-	0,22	2,03	0,38	6,84	7,54	7,27	7,73	61	75
17-dez	25,9	27,7	28,9	31,1	-	0,25	0,58	4,90	6,67	7,33	7,69	9,04	70	81
18-dez	25,8	27,8	28,2	28,4	-	0,41	2,60	0,45	6,61	7,52	7,4	7,47	69	77
21-dez	26,7	28,2	31,7	33,4	-	0,27	13,87	7,97	6,84	7,54	8,83	9,08	71	74
22-dez	26,6	28,1	30,1	31,2	-	7,9	0,38	0,39	6,77	7,52	8,48	8,61	75	81
28-dez	26,4	26,8	28,7	27,7	-	0,32	0,32	0,34	6,9	6,84	7,08	7,11	77	76
29-dez	23,4	25,9	26,2	26,3	-	2,74	0,41	1,62	6,66	6,79	6,87	7,02	32	33
4-jan	24,9	28,3	27,6	27,2	-	0,28	0,32	0,24	6,73	7,08	6,93	7,04	0	100
5-jan	27,1	26,4	27,8	27,2	-	0,36	0,59	0,73	6,92	7,16	6,92	7,09	19	38
6-jan	25,6	26,6	27,1	27,8	-	0,29	0,27	0,26	6,73	6,92	6,89	6,94	63	66

#### *Parâmetro OD – Etapa 2*

Na Figura 37 é possível observar a dispersão ao longo do espaço e do tempo para o parâmetro OD, nessa lagoa. Constata-se uma condição de alta dispersão dos resultados, onde os pontos 3 e 4 (meio da lagoa na segunda seção e

efluente final) apresentaram maiores concentrações na maioria das vezes, comparado não só ao ponto de entrada afluyente (esgoto bruto), mas principalmente comparado aos resultados da Etapa 1. Nesta etapa as concentrações apresentaram-se extremamente altas, e por estarem acima da concentração atmosférica máxima possível de ser encontrada em OD em corpos hídricos (25 °C, 8 mg L<sup>-1</sup>), pode representar nas condições ambientais existentes no período da amostragem a ocorrência intensa de atividade algal, conforme pontua Von Sperling (2008). No 10º dia a concentração média de OD decresce substancialmente, voltando a aumentar no 15º dia apenas e decaindo desse dia em diante. Após isso não há grandes variações. A partir do 20º dia (22/12/15) o sistema passa a ter concentrações de OD mais próximas em todos os pontos e muito inferiores aos dias anteriores, o que coincide com o momento em que as lemnas passam a ser a espécie dominante na superfície da lagoa (avaliação visual) e as remoções alcançam os maiores valores (75% para PT). As concentrações de OD nesse período também são próximas às encontradas no estudo realizado na Etapa 1. No 22º dia a remoção foi de 77% para PT. No dia 21/12/15 ainda é encontrada concentração de 13,87 mg L<sup>-1</sup> de OD no ponto 3.



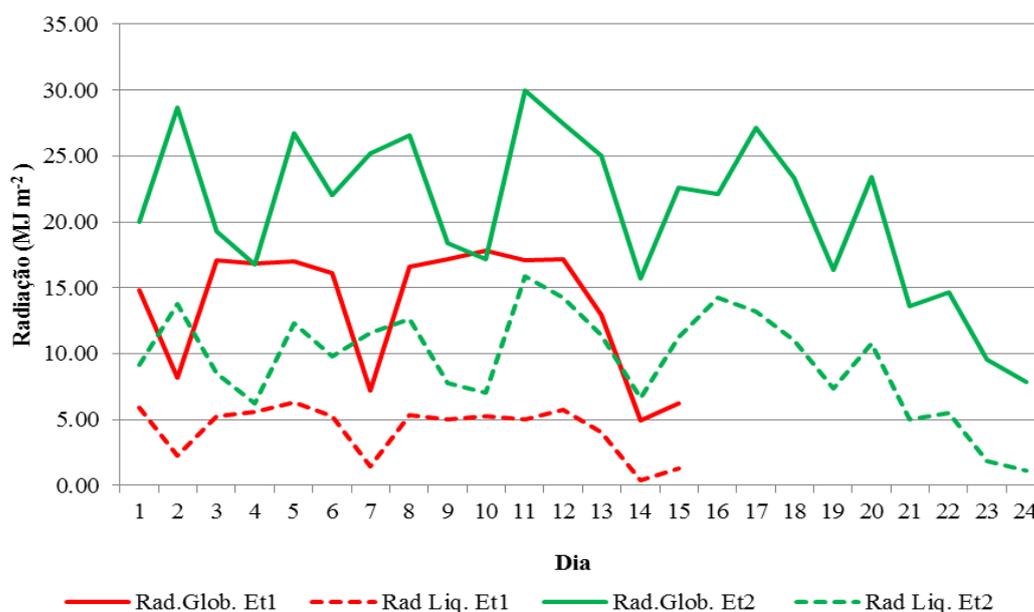
**Figura 37.** Dispersão do OD ao longo do espaço e do tempo na lagoa com lemnas, nos pontos de coleta da ETE, descritos anteriormente.

Mohedano (2010) em sua revisão sobre a ocorrência de OD em lagoas com lemnas relata registros de concentrações de OD de até 10 mg L<sup>-1</sup> pela altíssima concentração de algas e essa mesma condição foi comprovada nos testes da

etapa 2. Collins (2005) também relata a competição entre algas e lemnas, onde a predominância das algas se relaciona diretamente com as altas concentrações de OD.

### *Radiação UV – análise comparativa das Etapas 1 e 2*

Collins (2005) comenta sobre o efeito negativo da radiação UVB nas lemnas, propiciando uma condição onde estas acabem morrendo, e as algas se sobressaiam. Em circunstâncias onde os raios UVB são extremos, a predominância será das algas – fato que pode ter ocorrido na ETE Recreio considerando os resultados de todas as variáveis analisadas. A situação se inverte quando a radiação diminuiu por alguns dias, o que teria permitido que as lemnas voltassem a dominar a superfície. Na Figura 38 são apresentados os resultados de radiação líquida e global nas etapas 1 e 2. Nota-se que na etapa 2 houve valores maiores de radiação.



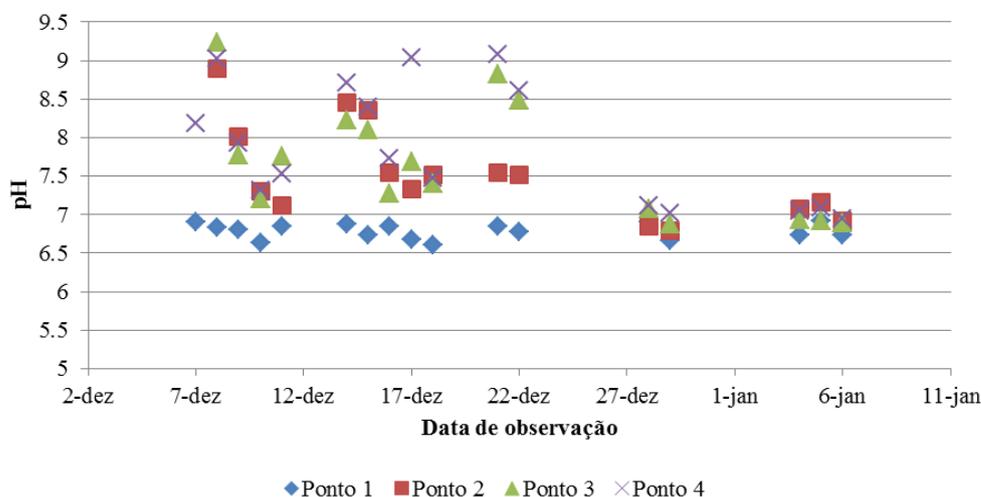
**Figura 38.** Radiação global e radiação líquida. Fonte: Dados meteorológicos ESALQ/USP.

Quando se correlaciona os resultados de remoção de PT e amônia com os da radiação global e líquida no período, observa-se correlação positiva entre estes parâmetros, sendo constatado para a amônia,  $r^2 = 0,59$  na Etapa 1 e  $0,58$  na Etapa 2, para PT  $r^2 = 0,53$  na Etapa 2. Não houve resultado significativo para a Etapa 1, radiação global e líquida x PT.

### Parâmetro pH – Etapa 2

Quanto ao pH (Figura 39) constata-se que no ponto 1 os valores se mantiveram certa Constancia, próximo a neutralidade (pH=7), porém para os demais pontos nota-se que houve aumento do pH atingido em alguns pontos pH=9, sendo que a partir do 20º dia os valores retornaram a um pH neutro (próximo a 7,0). Este efeito foi diferente do observado na etapa 1, porém coincidem com os obtidos por Mohedano (2010), que observou para este parâmetro elevações que foram relacionados com o desenvolvimento de algas, as quais tipicamente elevam o pH, conforme já exposto anteriormente. Possivelmente essa condição tenha ocorrido no sistema da ETE Recreio, pois conforme apresentado nas fotos, havia espaços vazios (sem lemnas), que assim permaneceram por vários dias, diminuindo a partir do 20º dia.

Portanto, todas as evidências apontam para a predominância das algas durante o período em que a radiação solar aparentemente exerceu efeito negativo sobre as lemnas, gerando uma diminuição considerável nos resultados obtidos para as remoções de nutrientes nesta etapa do estudo. A partir da diminuição da radiação solar por apenas alguns dias, as lemnas conseguiram se desenvolver a ponto de voltarem a predominar na superfície da lagoa.



**Figura 39.** Dispersão do pH ao longo do espaço e do tempo.

Diferente da Etapa 1, na Etapa 2 observa-se uma forte correlação entre os parâmetros OD x pH ; pH x Temp e OD x Temperatura (Tabela 17).

**Tabela 17.** Correlação entre os parâmetros T, ph, OD, RPT e RAM.

	T <sub>2</sub>	pH <sub>2</sub>	OD <sub>2</sub>	RPT <sub>2</sub>	RAM <sub>2</sub>
T <sub>2</sub>	1	0,86	0,76	-0,21	0,21
pH <sub>2</sub>		1	0,68	-0,01	-0,14
OD <sub>2</sub>			1	-0,11	-0,07
RPT <sub>2</sub>				1	Nd
RAM <sub>2</sub>					1

	T <sub>3</sub>	pH <sub>3</sub>	OD <sub>3</sub>	RPT <sub>3</sub>	RAM <sub>3</sub>
T <sub>3</sub>	1	0,90	0,68	0,04	0,21
pH <sub>3</sub>		1	0,77	0,22	0,23
OD <sub>3</sub>			1	0,13	0,05
RPT <sub>3</sub>				1	Nd
RAM <sub>3</sub>					1

	T <sub>4</sub>	pH <sub>4</sub>	OD <sub>4</sub>	RPT <sub>4</sub>	RAM <sub>4</sub>
T <sub>4</sub>	1	0,94	0,74	0,30	0,31
pH <sub>4</sub>		1	0,70	0,30	0,24
OD <sub>4</sub>			1	-0,12	0,05
RPT <sub>4</sub>				1	Nd
RAM <sub>4</sub>					1

Pontos de monitoramento da etapa 2: 2 - Meio da primeira seção; 3 - Meio da segunda seção; 4 - Saída ou efluente tratado.

#### *Concentração dos nutrientes e outros parâmetros físico-químicos – Etapa 2*

Nas Tabelas 18 e 19 são apresentados os resultados de P total, amônia, cor, turbidez, DBO, DQO, ST, STF, STV, SST, SSF, SSV, SS, das análises coletadas durante 30 dias, sendo determinada no ponto 1 (afluente) e 4 efluente. Conforme já comentado anteriormente, os demais parâmetros são apenas para comparação e como foram levantados durante o experimento, podem servir de referência para futuros trabalhos de pesquisa e por isso foram considerados.

Avaliando a concentração dos parâmetros na entrada e saída da lagoa (Tabelas 18 e 19) e calculando o que foi removido no processo tem-se a Tabela 20. São encontrados resultados de remoção negativa, os quais estão diretamente associados aos eventos de maior precipitação atmosférica (Figura 46). O que ocorreu foi

uma diluição dos esgotos brutos, com prejuízos ao experimento. Embora não tenha sido mensurada a vazão nesse período, os resultados, completamente anômalos e com concentrações diluídas, comprovam a tese de que houve influência negativa pela entrada de águas pluviais. A título de esclarecimento, há no Estado de São Paulo o Decreto Estadual 5916/75, no qual o artigo 13 proíbe expressamente a introdução direta ou indireta de águas pluviais nos ramais de esgotos sanitários, com previsão de penas e até multas. Até por conta disso, as estações de tratamento de esgoto são em geral projetadas para receber o volume de efluentes gerados pela carga orgânica estimada para a população a ser atendida - como é o caso da ETE Recreio, onde em capítulos anteriores o projeto desconsidera a média pluviométrica regional, por exemplo. A entrada de água de chuva gera problemas no tratamento, pois o esgoto diluído representa menor entrada de nutrientes para os organismos presentes (gerando déficit de desenvolvimento e crescimento), diminui o tempo de detenção hidráulico, entre outros problemas.

**Tabela 18.** Afluente da ETE Recreio (esgoto bruto).

Data	P <sub>total</sub>	Amônia	Cor	Turbidez	DBO	DQO	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV	SS
	---mg L <sup>-1</sup> ---		U.C	U.T	----- mg L <sup>-1</sup> -----								
7-dez	2,6	19,2	222,7	60	105	192	406	292	114	122	38	84	0,7
8-dez	1,4	14,4	234,4	126	175	281	414	256	158	86,7	20	66,7	1,0
9-dez	4,0	26,4	306,9	111	175	374	576	300	276	163,3	40	123,3	3,0
10-dez	1,8	10,7	245,5	117	115	215	396	240	156	144	46	98	2,5
11-dez	3,8	26,7	213,8	107	215	398	504	286	218	124	28	96	1,6
13-dez	2,4	22,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14-dez	3,2	26,5	255,8	79,2	155	243	418	246	172	110	34	76	1,2
15-dez	4,1	40,7	217,3	55,3	175	285	428	196	232	292	18	74	0,9
16-dez	3,1	28,5	255,2	59,7	115	218	378	206	172	114	30	84	1,5
17-dez	4,3	36,9	329,0	116,0	250	419	508	244	264	166	30	136	3,0
18-dez	4,2	29,3	306,3	113,0	260	434	530	258	272	130	30	100	2,0
20-dez	4,6	33,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21-dez	4,8	28,6	5266	195,0	310	571	730	374	356	222	46	176	3,0
22-dez	5,2	36,7	5176	175,0	300	569	694	344	350	246	40	206	5,5
23-dez	2,9	19,6	-	-	-	-	338	98	240	142	42	100	2,5
24-dez	6,5	40,5	-	-	-	-	1064	258	806	255	0	255	3,0
25-dez	6,7	45,3	-	-	-	-	520	246	274	222	34	186	4,0
26-dez	4,7	49,8	-	-	-	-	412	206	206	100	16	84	0,8
27-dez	4,9	45,1	-	-	-	-	360	150	150	120	10	112	3,5
28-dez	6,6	42,1	29622	203,0	340	662	384	354	354	326	64	262	8,0

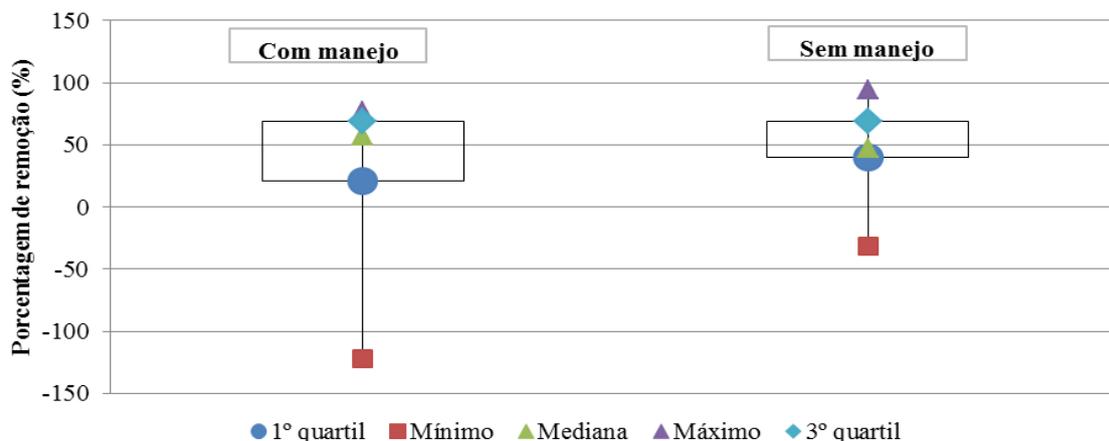




20-dez	63	79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21-dez	71	74	95	76	92	75	59	53	65	73	91	68	98
22-dez	75	81	94	75	92	74	55	47	63	64	75	62	99
23-dez	38	74	-	-	-	-	14	-27	31	56	95	40	98
24-dez	74	83	-	-	-	-	70	43	79	73	-	75	98
25-dez	75	87	-	-	-	-	40	29	50	68	100	62	99
26-dez	64	89	-	-	-	-	29	21	37	34	75	26	94
27-dez	61	86	-	-	-	-	19	-16	100	100	100	100	100
28-dez	77	76	99	81	91	78	23	49	68	86	100	82	98
29-dez	32	33	49	68	86	49	34	26	45	76	-	-	-
30-dez	-89	-159	-	-	-	-	100	100	100	100	-	-	-
31-dez	-75	-55	-	-	-	-	100	100	100	100	-	-	-
1-jan	0	-21	-	-	-	-	100	100	100	100	-	-	-
2-jan	-5	11	-	-	-	-	100	100	100	100	100	100	100
3-jan	-122	100	-	-	-	-	100	100	100	100	100	100	-
4-jan	0	100	32	30	-42	37	-6	-119	-19	34	84	-62	100
5-jan	19	38	-49	-46	100	100	100	100	100	100	100	100	100
6-jan	63	66	26	31	-	100	100	100	100	100	100	100	100

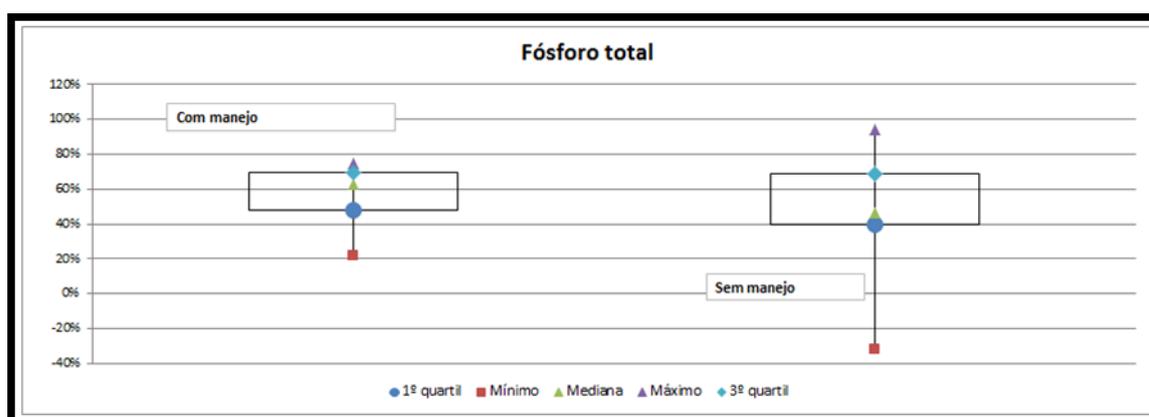
DBO – Demanda Básica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio; SS – Sólidos Solúveis; ST – Sólidos Totais; STF - Sólidos Totais Fixos; STV - Sólidos Totais Voláteis; SSF - Sólidos Suspensos Fixos; SSV - Sólidos Suspensos Voláteis.

Na Figura 40, compara-se o manejo com lemnas e sem o uso dessas macrófitas através da análise estatística box plot. Nesta segunda etapa a instabilidade do processo é intensa em termos de eficiência de remoção no período onde ocorreu o manejo. No período sem manejo constata-se comparativamente uma menor variabilidade de resultados para a eficiência de remoção do parâmetro fósforo, chegando até a remoções negativas muito maiores que as obtidas no teste da Etapa 1.

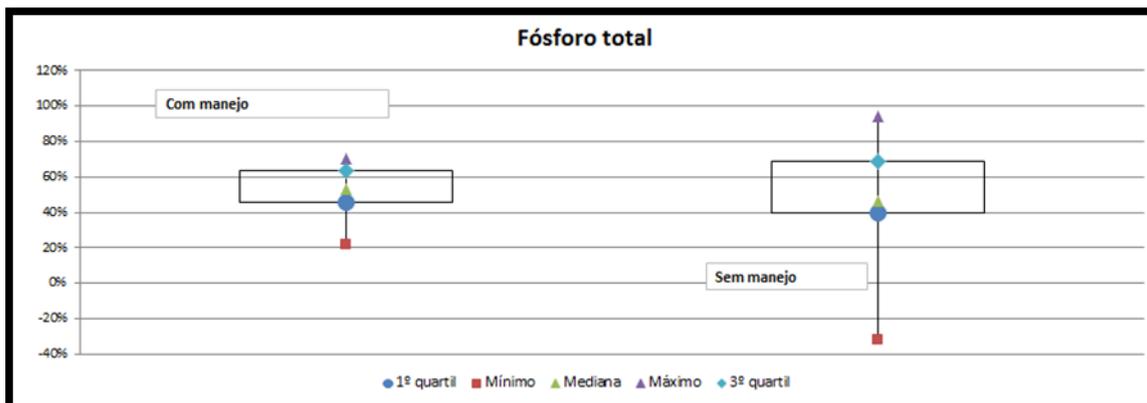


**Figura 40.** Box plot dos 30 dias de monitoramento, Etapa 2.

Analisando os resultados não mais em 30 dias de monitoramento, mas sim em 9 (Figura 41) e 15 (Figura 42) dias, constata-se um resultado de eficiência de remoção para PT e amônia significativamente melhor em comparação ao período sem manejo. De qualquer forma é importante pontuar que a Etapa 2 visou “calibrar” o trabalho com um período maior de monitoramento nas mesmas condições iniciais de processo operacional realizados na Etapa 1; teve ainda o objetivo de avaliar o efeito climático, ocasionado pela diferença sazonal; além de confirmar se há de fato um período ótimo de crescimento e um momento mais propício para o manejo. Não teve, entretanto, o objetivo de definir qual seria esse momento ótimo, tampouco a forma de retirada (frequência, quantitativo, etc.).

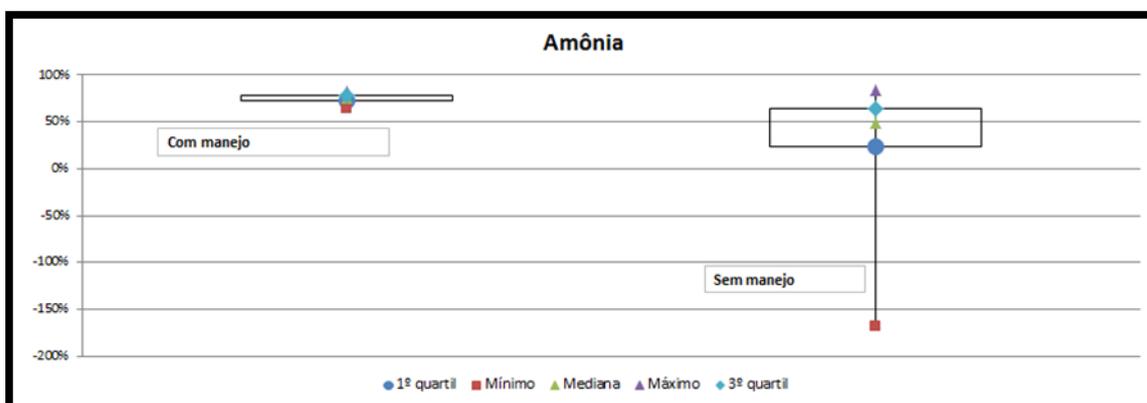


**Figura 41.** Box plot dos primeiros 15 dias de monitoramento.



**Figura 42.** Box plot dos primeiros 9 dias de monitoramento.

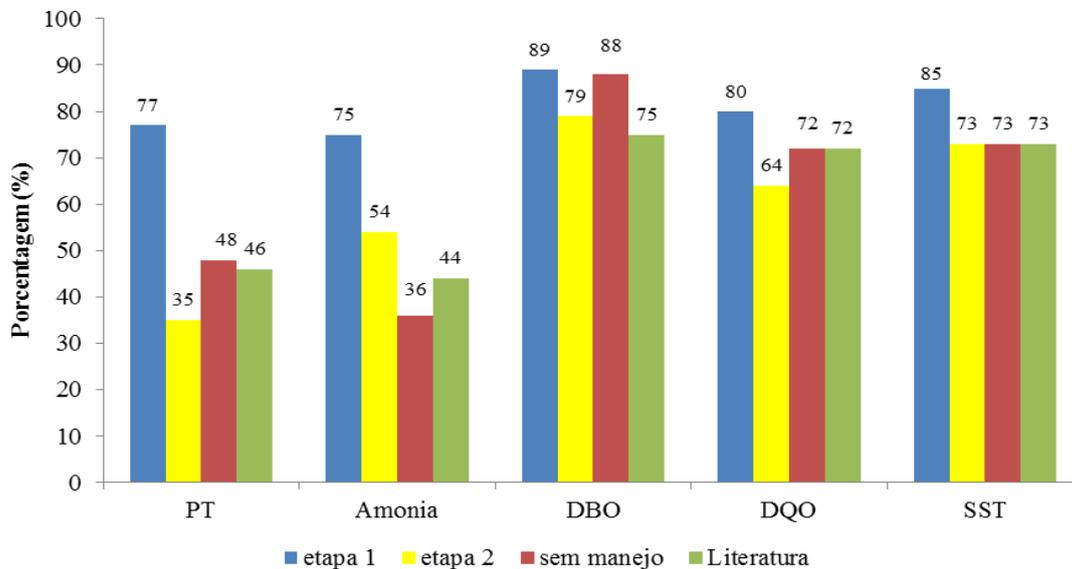
A eficiência de remoção da amônia foi estável ao longo de todo o processo e o período avaliado (Figura 43). Essa condição pode ser atribuída a vários fatores, já que a eliminação da amônia numa lagoa está associada a vários fatores que não apenas à presença de macrófitas (ZUGMAN, 1982), tais como a ação das algas e também pelas perdas por volatilização, além da assimilação por bactérias. Entretanto, é importante constatar que a ação das lemnas aumentou expressivamente a remoção no processo.



**Figura 43.** Box plot para o parâmetro amônia.

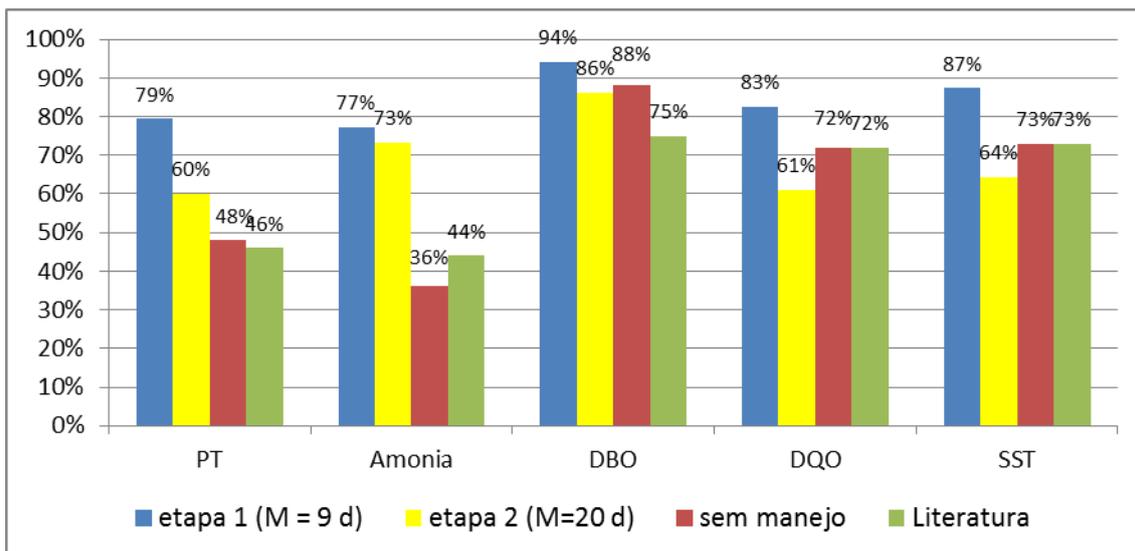
Nas Figuras 44 e 45 são apresentados os valores de remoção de PT, amônia, DBO, DQO, SST nas águas da lagoa, considerando o período total de avaliação, inclusive comparando também com resultados da Etapa 1 e com dados da literatura (não específicos para lemnas). Verifica-se que a primeira etapa apresentou excelentes resultados com menor interferência das algas no sistema e, maior desenvolvimento das lemnas, observado pelo menor tempo de cobertura da superfície da

lagoa. Já para a Etapa 2 observa-se menores porcentagem de remoção para PT e DQO em comparação ao sem manejo e também com os dados da literatura. Já para resultados de SST os resultados foram iguais ao sem manejo e a da literatura, enquanto que para DBO a etapa 2 superou apenas os resultados observados na literatura.



**Figura 44.** Porcentagem de remoção para alguns parâmetros de qualidade de água da Lagoa Recreio – Charqueada comparando duas avaliações realizadas com dados da literatura e sem manejo com macrófitas.

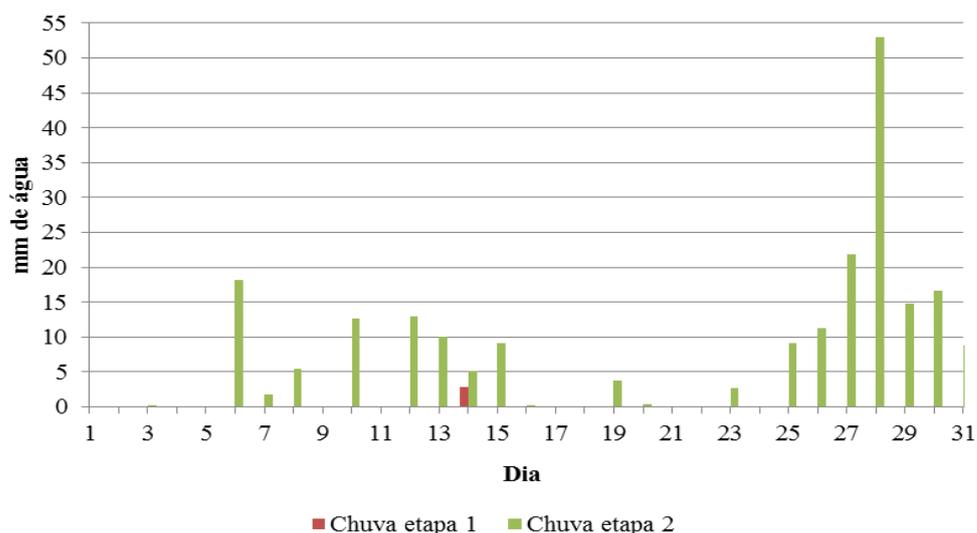
Quando se considera o tempo ótimo de manejo pode-se considerar que os efeitos foram favoráveis na Etapa 2 apenas para PT e amônia. Para os demais parâmetros a remoção ocorrida Etapa 2 foi inferior em relação ao sem manejo.



**Figura 45.** Remoções médias gerais comparativas considerando o tempo ótimo de manejo.

Uma das hipóteses para explicar o comportamento diferenciado e inferior de diminuição dos teores de PT, amônia, DBO, DQO e SST ocorrido na Etapa 2 em relação a 1 é o efeito da radiação solar, que influenciou o aumento de competição das algas no tanque, sobre as lemnas até o 10º dia.

As chuvas ocorridas durante o segundo experimento foram muito mais intensas que no primeiro, podendo este ser considerado mais um fator de variação entre as duas etapas (Figura 46).

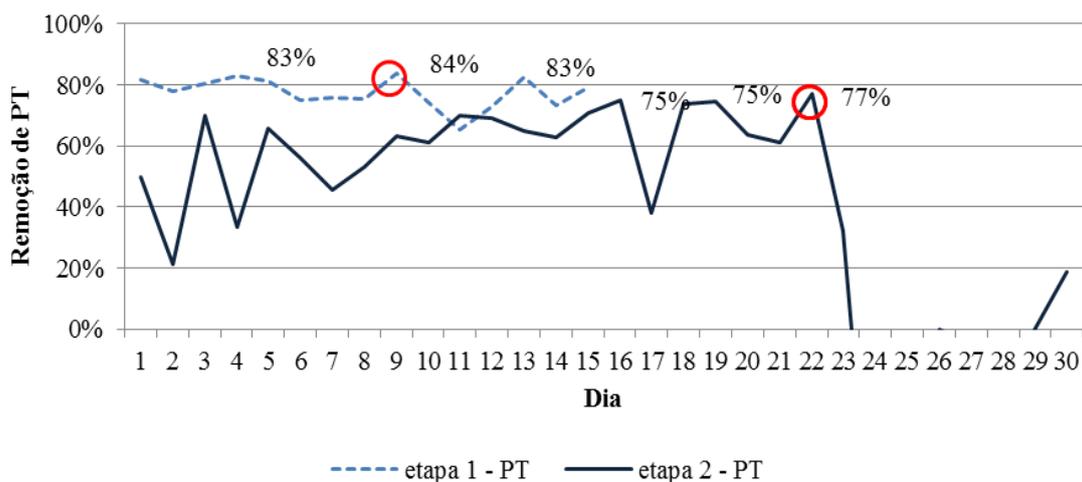


**Figura 46.** Precipitação a durante o experimento – Etapas 1 e 2

### 4.3 Resultados de remoção dos nutrientes nas etapas 1 e 2

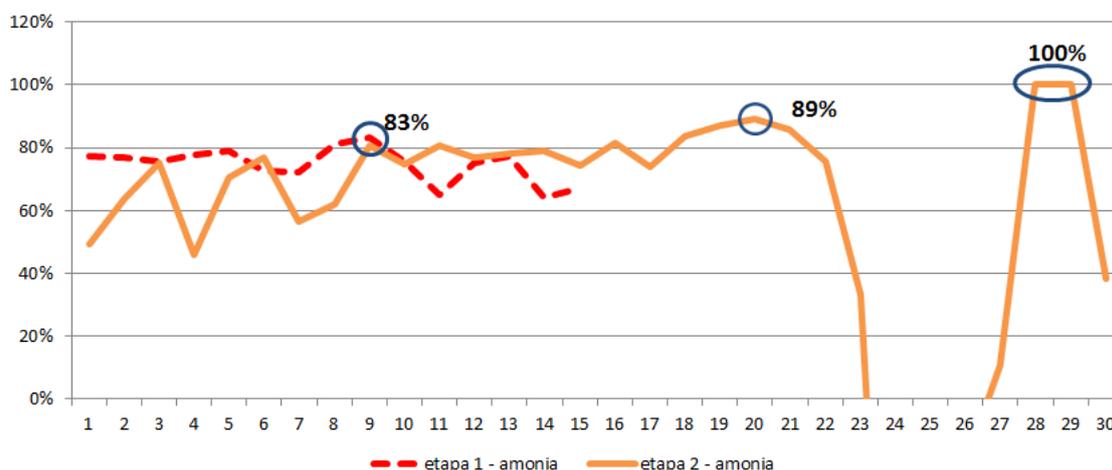
Na literatura há citações de que a remoção máxima ocorreria entre o 6º e 10º dias para as espécies nitrogenadas, e entre o 5º e 9º dias para o fósforo total, sendo que para este último, entre o 12º e 20º dia essa remoção seria próxima a zero (MOHEDANO, 2010; ALAHMADY et al., 2012). Cada autor define, portanto, a partir de suas experiências, o tempo ótimo para manejo. Mohedano (2010) considera estudos anteriores e determina que o manejo seja feito a partir da observação da massa de lemnas formadas, e que estas se apresentando entre 300 e 600 g m<sup>-2</sup> teriam atingido o ponto ótimo entre remoção e crescimento. Já Alahmady et al., (2012) estabelecem o prazo máximo de 5 dias.

No presente estudo, verifica-se que na Etapa 1 as remoções para o parâmetro PT mantiveram-se acima de 66% por 15 dias. Já na Etapa 2 constata-se maior oscilação nos primeiros dias, com remoção ótima sendo atingida entre o 16º e 22º dia. Na Etapa 1 constatou-se uma predominância das lemnas, período de menor luminosidade no ano (inverno), e temperaturas amenas. Já na Etapa 2 constatou-se condições de radiação solar extrema na maior parte dos dias, com predominância de algas até o 10º dia de experimento. A remoção máxima se deu no 22º dia, caindo expressivamente desse dia em diante (Figura 47). Apesar disso, a maioria dos resultados diários de remoção até o 22º dia são maiores do que os apresentados em vários trabalhos científicos.



**Figura 47.** Remoções de PT diárias – Etapas 1 e 2 do experimento.

As remoções para o parâmetro amônia (Figura 48) são muito superiores aos de PT na Etapa 2, embora a Etapa 1 tenha apresentado melhores resultados médios para esse parâmetro, considerando o período inteiro. No entanto, considerando até a data com maior remoção, que ocorreu no 20º dia, a eficiência de remoção foi superior na Etapa 2.



**Figura 48.** Remoções de amônia diárias - Etapas 1 e 2 do experimento.

Os resultados indicam que há uma maior eficiência de remoção do sistema como um todo para o parâmetro amônia do que para o parâmetro PT. O que confirmaria que a dinâmica de remoção de amônia é diferente da que ocorre para o PT.

Para ambos os parâmetros, a remoção foi afetada negativamente pela presença de algas na Etapa 2, o que pode ser concluído a partir da comparação dos resultados dos dois testes (Etapa 1 e Etapa 2). Entretanto, a eficiência de remoção para o parâmetro PT permaneceu por mais dias do que para o parâmetro amônia, neste estudo, similar aos resultados obtidos por Alahmady et al., (2012) em um estudo em escala piloto.

#### **4.4 Utilização da massa seca para mistura de biossólido oriundo de ETE e uso na agricultura**

A SABESP possui equipamento automatizado, desenvolvido em 2013, que permite ao mesmo tempo a secagem e a compostagem de lodo úmido retirado dos processos de tratamento de esgoto, com baixo custo operacional. Esse processo está no momento passando por obtenção das licenças ambientais para posteriormente ser destinado para uso agrícola. Entretanto, já atende à legislação vigente. O sistema

automatizado permite receber macrófitas como a lemna, que possui reduzidas dimensões, de forma a ser agregada ao lodo. Neste estudo não foi possível realizar teste em escala real, mas uma estimativa considerando os resultados obtidos a partir das análises de laboratório e os dados para o material fertilizante obtido é apresentada a seguir:

Considerando a retirada média de 600 g de massa de lemna  $m^{-2}$ ; e a concentração de P presente na massa seca (13,86 mg de P  $kg^{-1}$  de massa seca) pode-se estimar:

a) biomassa úmida de lemnas: 2.982 kg a cada 9 dias, considerando o valor de 300 g de biomassa úmida por  $m^2$  (a remoção não pode ser total, mas sim parcial);

b) biomassa seca de lemnas: 149,1 kg a cada 9 dias ou aproximadamente 500 kg  $mês^{-1}$ .

c) fósforo total na massa seca: considerando 500 kg  $mês^{-1}$  multiplicado pela concentração de P (13,86g  $kg^{-1}$ ), tem-se que 6,9 kg de P deverão ser adicionados em aproximadamente 90 toneladas de lodo seco com 20% de umidade e em média 30 g de P  $kg^{-1}$ . Portanto, a adição dessa massa não irá afetar a concentração de P no lodo de esgoto, por se tratar de uma pequena quantidade adicional. Fazendo os cálculos, com a adição de P das lemnas, a concentração de P do lodo passará a 30,01g de P  $kg^{-1}$  na massa seca a 80%.

O avanço tecnológico e o desenvolvimento de novos equipamentos como o referenciado aqui trazem alternativa para a destinação dessas macrófitas, que não apenas o aterro ou uso na ração animal. De forma que o cenário exposto por Polisel (2005) não é real para os dias atuais.

#### **4.5 Análise da viabilidade econômica do uso de lemnas para remoção de nutrientes**

A Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA, 2013) estimou os custos de alteração de um sistema por lagoas, considerando a vazão a ser tratada, as concentrações de fósforo e nitrogênio a serem alcançadas e os custos de operação e manutenção.

Ao aplicar a metodologia da USEPA (2013) para os dados obtidos em Polisel (2005) (vazão, concentração de PT), estima-se que os custos<sup>7</sup> para alteração dos 70 sistemas compostos por lagoas do trabalho apresentado iriam requerer investimentos da ordem de US\$ 4.689.266,00. Os custos mensais relacionados ao ciclo de vida, operação e manutenção seriam de US\$ 145.252,00. Todos esses custos não levam em consideração o investimento para licenciamento (10% do valor da obra), projetos e mão-de-obra especializada brasileira, liberação de áreas para construção, recolhimento de taxas, etc.

Embora o presente estudo e seus resultados tenham apresentado oscilações de remoção diária, e que o processo necessita de adaptações para obter melhores resultados (otimizações como implantação de manejo adequado, melhor controle de movimentação das macrófitas sob influencia dos ventos, etc), pode-se afirmar nas condições atuais que um sistema operado por lemnas atingiria remoções de até 75% para PT e amônia, ao menos se ocorre uma remoção parcial a cada 10 dias.

Segue o estudo de viabilidade econômica, considerando três possibilidades diferentes:

1. Cenário 1 - Implantar um sistema de tratamento de lemnas na lagoa da forma como ela se encontra, realizando o manejo e destinação para compostagem – produto fertilizante agrícola;
2. Cenário 2 – Acrescentar ao processo atual sistema para remoção química, conforme recomendado pela USEPA (2013);
3. Cenário 3 – Desativar a ETE atual e implantar nova ETE compacta com remoção associada.

Cabe ressaltar que para os Cenários 2 e 3 não estão sendo considerados a necessidade e custo de desapropriação de área para adicionar unidades de processo; custos com licenciamento; custos para desativação (no caso do cenário 3). Além disso, o lodo gerado após remoção química não tem condições de uso para reciclo, ou seja, compostagem. Deverá ser encaminhado para aterro sanitário especial, o que gera um maior custo, além do custo do transporte.

Finalmente, o sistemas dos Cenários 2 e 3 não contemplam a remoção de amônia.

---

<sup>7</sup> Anexo I

## ETE Recreio - Charqueada - Processo para Redução de Fósforo do Lodo da ETE

Custo médio do agente de saneamento ambiental por mês em Charqueada com encargos:	R\$	8.277,77
Cotação do dólar americano para compra - Banco Central do Brasil em 26 de abril de 2016:	R\$	3,5466
Horizonte do Projeto (final de contrato):		26 anos
		1 tonelada = 67 m <sup>3</sup> de lodo

### Cenário 1

#### Implantar tratamento com lemnas na ETE atual

- Construção de leito de secagem para o lodo.
- Mão de obra para retirada parcial das lemnas a cada 9 dias ou 3 vezes por mês (2 agentes ambientais por 8 h).
- Transporte da massa seca para a ETE Lageado - Botucatu: R\$ 2.500,00 / mês

CUSTO		
Investimento	R\$	4.000,00
Operação	R\$	1.986,66
Transporte	R\$	2.500,00
<b>VPL</b>	<b>-R\$</b>	<b>380.807,83</b>

### Cenário 2

#### Acrescentar remoção química no final do processo da ETE atual

- Implantação do sistema de remoção química (US\$109.571,00)
- Custo de operação e manutenção US\$ 1.514,00
- Transporte do lodo para o aterro sanitário: R\$ 2.500,00/ 10 ton
- Custo para disposição de 87 ton em aterro sanitário: R\$ 332,69/tonelada

Investimento	R\$	388.604,51
Operação/manut.	R\$	5.369,55
Transporte	R\$	22.500,00
Aterro	R\$	28.944,03
<b>VPL</b>	<b>-R\$</b>	<b>5.111.220,64</b>

### Cenário 3

#### Desativar a ETE atual e implantar nova ETE Compacta

- Custo de aquisição de ETE compacta: R\$ 550.000
- Custo operacional: 01 agente 3 vezes por semana por 4 h
- Transporte do lodo para o aterro sanitário: R\$ 2.500,00/ 10 ton
- Custo para disposição de 87 ton em aterro sanitário: R\$ 332,69/tonelada

Investimento	R\$	550.000,00
Operação	R\$	1.986,66
Transporte	R\$	22.500,00
Aterro	R\$	28.944,03
<b>VPL</b>	<b>-R\$</b>	<b>4.964.760,97</b>

### Conclusão

Comparando os três cenários acima, sob o aspecto estritamente econômico-financeiro a melhor opção é a do **cenário 1**.

## Figura 49. Cálculo da viabilidade econômica do tratamento.

Portanto, comparando os três cenários acima apresentados, sob o aspecto estritamente econômico-financeiro (Valor Presente Líquido), a melhor opção é a implantação de lemnas quando em uma lagoa já existente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como recomendações para futuros projetos a serem realizados também em escala real, o estabelecimento de um protocolo de manejo visando otimizar a eficiência do processo.

A avaliação de métodos para atenuação dos efeitos da radiação solar, seja através de introdução de outras espécies menos susceptíveis, seja pelo manejo

adequado que garanta vantagem competitiva das macrófitas sobre as algas. E um estudo para implantação de um sistema de remoção das lemnas de forma automatizada.

## 6. CONCLUSÃO

O sistema de lagoa da ETE Recreio, em Charqueada-SP - utilizando lemnas promoveu melhorias na qualidade da água, afetando principalmente os parâmetros de PT e amônia e atingindo remoções acima de 75% para ambos os parâmetros, considerando os períodos de maior remoção.

Considerando as duas etapas de avaliações em duas diferentes épocas, mostrou que parâmetros climáticos podem alterar a eficiência do processo.

O estudo de viabilidade econômica apresentou VPL positivo em comparação a outras duas alternativas que envolvem a remoção química, sendo que a avaliação do VPL considerou apenas processos que removem PT. A associação de operações unitárias para remoção de amônia, o que é feito naturalmente com a presença de lemnas, aumentaria ainda mais a atratividade econômica para essa alternativa.

O período ótimo de remoção após o início do processo variou entre as etapas.

## 7. REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Planos de Recursos Hídricos e o Enquadramento de Corpos d'Água. 2011. Disponível em: <[http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/planejamento/PlanejamentoRH\\_enquadramento.aspx](http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/planejamento/PlanejamentoRH_enquadramento.aspx)> acesso em 12 de Dezembro de 2015.

AZEVEDO NETTO, J. M. D. Aspectos construtivos de lagoas de estabilização. **Revista DAE**, v. 45, n. 140, p. 44-9, 1985.

BERNARDES, R. F. de . Estabilização de Poluentes por Disposição no Solo. **DAE** 145(46): 129-145, 1986.

BRANCO, F. R. L. **Avaliação do potencial de duas espécies de lentilha-de-água Lemna minor e Lemna gibba na remoção de nutrientes em efluente aquícola.** Faculdade de Ciências do Porto, 2012.

BRUGNANO, N. **Avaliação de lagoas de lemnas (*Landoltia punctata*) para o polimento de esgoto sanitário e fixação de gás carbônico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas à Agricultura. Disponível em: < <http://www.cepagri.unicamp.br/>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2015.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Licenciamento Ambiental. 2007.

Disponível em: < <http://licenciamentoambiental.cetesb.sp.gov.br/> > acesso em 13 de janeiro de 2016.

COLLINS, S. A. **UV-B sensitivity of aquatic plants: the impact of artificial ultraviolet radiation on the survival and chlorophyll content of Lemna minor and Spirodela polyrhiza.** Dissertation. Department of Biology, University of Winnipeg, 2005.

CONAMA 357/05 – CONSELHO NACIONAL DO 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. **Diário Oficial da União.**

CONAMA 430/11 – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes complementam e alteram a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União.**

FERREIRA, T. F.; DA MOTTA MARQUES, D. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos.** Modelagem Ecológica, 2009.

GARCIA, D. C. de O. **Avaliação de lagoas de lemnáceas no polimento de esgoto doméstico e produção de biomassa.** 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/123655>>.

KAWAI, M.; PURWANTI, I.F.; NAGAO, N.; SLAMET, A.; HERMANA, J.; TODA, T. Seasonal variation in chemical properties and degradability by anaerobic digestion of landfill leachate at Benowo in Surabaya, Indonesia. **Journal of Environmental Management** , v. 10, p. 267-275. 2012.

LIMA, M.R. et al. Avaliação do crescimento e retenção de nutrientes provenientes da eutrofização, em três macrófitas aquáticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. **Anais.** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-Rom.

JERÔNIMO, G. C. C. **Modelos não lineares aplicados ao crescimento da macrófita Lemna minor.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2015.

MARONEZE, M. M. et al. A tecnologia de remoção de fósforo: gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Rev. Ambient. Água.** vol. 9 n. 3, p. 445. Taubaté - Jul./Sep 2014.

MOHEDANO, R. A. **Uso de macrófitas lemnáceas (Landoltia punctata) no polimento e valorização do efluente de suinocultura e na fixação de carbono.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M, Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1: análise de desempenho. **Eng. Sanit. Ambient.** (ABES) vol.10, n.4, p. 347-357. 2005.

POLISEL, K. C. **Desempenho de lagoas de maturação utilizando macrófitas aquáticas e chicaneamento.** 2005. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-25012006-091009/>>. Acesso em: 2015-12-09.

POTT, V.; CERVI, A. C. A família Lemnaceae Gray no Pantanal (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), Brasil. **Revista brasil. Bot.**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 153-174, ago. 1999.

SÃO PAULO. Decreto Estadual N. 5916. Aprova o Regulamento a que se refere o artigo 22 do Decreto-lei n. 211, de 30 de março de 1970, que dispõe sobre normas de promoção, preservação e recuperação da saúde no campo de competência da Secretaria de Estado da Saúde. **Diário Oficial da União.** 13 de março de 1975.

SÃO PAULO. Decreto Estadual N. 8468. Aprova o regulamento da Lei n. 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição no meio ambiente. **Diário Oficial da União.** 8 de setembro de 1976.

SÃO PAULO. Deliberação do Conselho Estadual de Recursos Hídricos 161. Aprova indicação ao Fehidro dos empreendimentos de abrangência e interesse estadual para o exercício de 2014. 09 de setembro de 2014. **Diário Oficial do Estado de São Paulo.** 12 de setembro de 2014. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/diarios/76530956/dosp-executivo-caderno-1-12-09-2014-pg-51>> acesso em 08 de Dezembro de 2015.

SÃO PAULO. Deliberação do Comitê das Bacias Hidrográficas do rio Sorocaba e Médio Tietê 317. Implantação do ponto de monitoramento de qualidade pela CETESB. 03 de novembro de 2014. **Diário Oficial do Estado de São Paulo.** 29 de abril de 2015. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/diarios/90695571/dosp-executivo-caderno-1-29-04-2015-pg-65>> acesso em 08 de Dezembro de 2015.

TAVARES, F. A. **Eficiência da *Lemna sp* no tratamento de efluentes líquidos de suinocultura e sua utilização como fonte alternativa de alimentos para tilápias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Aquicultura - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.

THOMANN, R. VB., MUELLER, J. A. Principles of surface water quality modeling and control. New York: Harper & Row, 1987.

THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas. Ed. EDUEM, Maringá, 2003.

USEPA. Cost estimate of phosphorus removal at wastewater treatment plants - a Technical Support Document prepared for Ohio Environmental Protection Agency by Tetra Tech. May, 2013. Disponível em <[http://epa.ohio.gov/Portals/35/wqs/nutrient\\_tag/OhioTSDNutrientRemovalCostEstimate\\_05\\_06\\_13.pdf](http://epa.ohio.gov/Portals/35/wqs/nutrient_tag/OhioTSDNutrientRemovalCostEstimate_05_06_13.pdf)> acesso em 15 de março de 2005.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **In: Princípios básicos do tratamento de esgotos.** DESA - UFMG. 1996.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **In: Princípios básicos do tratamento de esgotos.** DESA - UFMG. Ed. 3, 2009.

ZUGMAN, J. Lagoas de estabilização de esgotos: separação de algas e remoção de nitrogênio amoniacal nos seus efluentes. **Revista DAE**, Ed. 72, p. 322-346, 1982.

## Anexo I - Investimento na tecnologia mais barata – precipitação química.

Condições técnicas: concentração média de fósforo total afluente – entre 6 e 8 mg L<sup>-1</sup>

Vazão méd/ ETE <sup>1</sup>	Vazão	Galões	Custo <sup>2</sup>		
			Precipitação química	Operação e manutenção	Ciclo de vida útil
L s <sup>-1</sup>	L dia <sup>-1</sup>	Por dia	-----US\$ -----		
4	345600	78545	48698	330	680
2,5	216000	49091	30436	206	425
3	259200	58909	36524	248	510
4	345600	78545	48698	330	680
1,16	100224	22778	14122	96	197
12	1036800	235636	146095	990	2039
3	259200	58909	36524	248	510
3	259200	58909	36524	248	510
1,82	157248	35738	22158	150	309
9,5	820800	186545	115658	784	1614
2,5	216000	49091	30436	206	425
4	345600	78545	48698	330	680
1	86400	19636	12175	83	170
2	172800	39273	24349	165	340
2	172800	39273	24349	165	340
8	691200	157091	97396	660	1359
60	5184000	1178182	223855	4952	10194
4	345600	78545	48698	330	680
17,64	1524096	346385	214759	1456	2997
3	259200	58909	36524	248	510
1,9	164160	37309	23132	157	323
8	691200	157091	97396	660	1359
2	172800	39273	24349	165	340
6	518400	117818	73047	495	1019
52	4492800	1021091	194007	4292	8835
93	8035200	1826182	346975	7675	15801
2	172800	39273	24349	165	340
3	259200	58909	36524	248	510
2	172800	39273	24349	165	340
3,6	311040	70691	43828	297	612
2	172800	39273	24349	165	340
2	172800	39273	24349	165	340

---

2	172800	39273	24349	165	340
20	1728000	392727	74618	1651	3398
10	864000	196364	121745	825	1699
3	259200	58909	36524	248	510
0,77	66528	15120	9374	64	131
18	1555200	353455	219142	1486	3058
2	172800	39273	24349	165	340
24,65	2129760	484036	91967	2034	4188
3	259200	58909	36524	248	510
0,77	66528	15120	9374	64	131
18	1555200	353455	219142	1486	3058
2	172800	39273	24349	165	340
24,65	2129760	484036	91967	2034	4188
3	259200	58909	36524	248	510
4	345600	78545	48698	330	680
6	518400	117818	73047	495	1019
9	777600	176727	109571	743	1529
3	259200	58909	36524	248	510
4,2	362880	82473	51133	347	714
2	172800	39273	24349	165	340
11	950400	216000	133920	908	1869
3	259200	58909	36524	248	510
6	518400	117818	73047	495	1019
1,05	90720	20618	12783	87	178
5,9	509760	115855	71830	487	1002
3	259200	58909	36524	248	510
3	259200	58909	36524	248	510
6	518400	117818	73047	495	1019
2	172800	39273	24349	165	340
2	172800	39273	24349	165	340
5	432000	98182	60873	413	849
3	259200	58909	36524	248	510
2	172800	39273	24349	165	340
2	172800	39273	24349	165	340
2	172800	39273	24349	165	340
6	518400	117818	73047	495	1019
5	432000	98182	60873	413	849
2	172800	39273	24349	165	340

---

---

2	172800	39273	24349	165	340
8	691200	157091	97396	660	1359
9	777600	176727	109571	743	1529
0,8	69120	15709	9740	66	136
<b>TOTAL</b>			<b>US\$ 4.689.266</b>	<b>US\$ 47.490/mês</b>	<b>US\$ 97.762/mês</b>

---

1 – Vazão média de acordo com Polisel, 2015; 2 - Custo de acordo com USEPA, 2013.

## Anexo II - Variáveis meteorológicas.

Dia	Tmin	Tmax	Tmed	UR m	Vel.Vto	Vel.Vto M	Hora	Chuva	Rad.Glob.	Rad Liq
	----- °C -----			%	----- m s <sup>-1</sup> -----			mm	----- MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> -----	
18/06	15,2	30,3	22,6	92,1	1,5	7,7	1513	0,0	14,78	5,89
19/06	14,4	21,2	17,7	92,0	1,9	9,2	1411	0,0	8,15	2,23
20/06	13,4	24,9	18,2	89,6	1,1	7,0	851	0,0	17,11	5,24
21/06	11,8	26,8	18,4	92,4	0,5	4,7	1158	0,0	16,81	5,55
22/06	12,7	27,5	19,5	90,2	0,6	5,5	1252	0,0	17,02	6,30
23/06	12,8	27,2	19,6	88,4	0,7	7,7	2018	0,0	16,09	5,28
24/06	15,6	20,9	17,6	93,2	1,7	10,0	2003	0,0	7,23	1,45
25/06	14,6	24,1	18,0	86,8	1,7	7,7	823	0,0	16,56	5,34
26/06	11,5	24,0	17,3	89,2	0,9	7,0	923	0,0	17,19	5,03
27/06	8,8	24,4	16,2	86,3	0,6	6,2	1146	0,0	17,80	5,26
28/06	7,9	24,2	15,7	84,8	0,6	6,2	1153	0,0	17,04	5,03
29/06	8,8	26,3	17,1	85,8	0,9	7,7	1137	0,0	17,16	5,75
30/06	12,5	26,0	19,4	88,3	1,3	9,2	1012	0,0	12,92	4,03
1/07	15,5	21,8	18,2	99,9	0,3	4,0	328	2,9	4,92	0,39
2/07	16,9	22,9	19,3	99,9	0,3	4,0	2034	0,1	6,20	1,27
7/12	21,7	33,8	26,2	97,3	0,7	7,0	2009	1,7	20,02	9,13
8/12	21,7	36,1	27,5	93,9	0,7	8,5	1717	5,4	28,66	13,73
9/12	22,9	33,4	27,7	97,4	0,7	4,7	1301	0,0	19,31	8,46
10/12	22,0	31,6	26,0	99,9	1,2	9,2	636	12,7	16,80	6,21
11/12	21,9	34,5	27,8	93,9	0,7	4,7	1433	0,0	26,71	12,33
12/12	20,5	35,2	26,3	99,9	1,0	18,2	1234	13,0	22,06	9,76
13/12	22,9	35,7	27,8	96,1	1,2	10,7	1332	10,0	25,21	11,58
14/12	23,0	37,0	28,6	89,7	1,3	9,2	1132	5,2	26,53	12,63
15/12	23,5	37,2	26,5	99,9	0,7	10,7	1320	9,1	18,38	7,80
16/12	23,3	32,4	27,1	99,2	1,8	7,7	1930	0,3	17,18	7,06
17/12	21,5	37,9	29,1	85,6	0,6	4,7	5	0,0	29,99	15,85
18/12	22,3	37,0	28,7	79,9	0,9	6,2	1458	0,0	27,45	14,27
19/12	20,9	33,7	25,8	93,4	1,4	10,7	134	3,7	24,99	11,39
20/12	21,2	30,3	25,3	95,4	0,7	5,5	2118	0,4	15,71	6,62
21/12	22,4	33,5	26,8	90,8	0,7	7,0	1905	0,0	22,61	11,23
22/12	21,7	33,7	26,2	94,2	1,0	7,7	1728	0,0	22,07	14,23
23/12	22,0	35,2	28,5	93,0	1,2	7,0	730	2,7	27,14	13,21

24/12	22,6	34,8	27,3	92,7	1,1	10,0	1425	0,0	23,32	10,97
25/12	22,4	31,5	25,5	99,9	0,8	7,7	1711	9,1	16,39	7,35
26/12	22,8	34,6	26,4	99,9	0,6	7,0	1331	11,3	23,39	10,74
27/12	22,0	30,9	25,8	99,9	0,7	8,5	1648	21,9	13,57	5,01
28/12	22,6	31,0	25,6	99,9	0,9	6,2	1226	53,0	14,67	5,48
29/12	22,9	28,3	24,7	99,9	0,9	9,2	1230	14,8	9,56	1,84
30/12	22,2	27,8	24,4	99,9	0,9	7,7	1305	16,7	7,83	1,09
31/12	23,8	35,4	27,5	99,4	1,0	10,7	1716	8,8	19,92	9,57

---