



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Química

VANESSA CRISTINA DE BIASSIO

TRATAMENTO DE EFLUENTE NA INDÚSTRIA DE EUCALIPTO  
UTILIZANDO ELETROFLOTAÇÃO

EFFLUENT TREATMENT IN THE EUCALYPTUS INDUSTRY  
USING ELECTROFLOTATION

CAMPINAS  
2017

VANESSA CRISTINA DE BISSIO

TRATAMENTO DE EFLUENTE NA INDÚSTRIA DE EUCALIPTO  
UTILIZANDO ELETROFLOTAÇÃO

*Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Química.*

*Orientador: JOÃO SINÉZIO DE CARVALHO CAMPOS*

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA VANESSA CRISTINA DE BIASSIO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. JOÃO SINÉZIO DE CARVALHO CAMPOS.

CAMPINAS  
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

B47t Biassio, Vanessa Cristina de, 1988-  
Tratamento de efluente na indústria de eucalipto utilizando eletroflotação /  
Vanessa Cristina de Biassio. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: João Sinézio de Carvalho Campos.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade  
de Engenharia Química.

1. Tratamento de efluente. 2. Eucalipto. 3. Eletrólise. 4. Flotação. 5. Água. I.  
Sinézio, João de Carvalho Campos, 1955-. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Effluent treatment in the eucalyptus industry using electroflotation

**Palavras-chave em inglês:**

Effluent treatment

Eucalyptus

Electrolysis

Floating

Water

**Área de concentração:** Ciência e Tecnologia de Materiais

**Titulação:** Mestra em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

João Sinézio de Carvalho Campos

Viktor Oswaldo Cárdenas Conchas

Wagner dos Santos Oliveira

**Data de defesa:** 16-03-2017

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Vanessa Cristina de Biassio e aprovada em  
16 de Março de 2017 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



---

Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos (orientador)  
Faculdade de Engenharia Química / UNICAMP



---

Prof. Dr. Viktor Oswaldo Cárdenas Conchas  
Faculdade de Engenharia Química / UNIFESP



---

Prof. Dr. Wagner dos Santos Oliveira  
Faculdade de Engenharia Química / UNICAMP

Dedico este trabalho às pessoas que mais amo e que me ajudam a enfrentar as dificuldades, a crescer e aprender cada dia mais, minha mãe e meu esposo.

## AGRADECIMENTOS

À empresa Brotale Florestal Ltda, pelo fornecimento de efluente para estudo.

Ao Laboratório de Saneamento da FEC, UNICAMP, pelas análises realizadas em especial ao biólogo Fernando P. Candello por sua atenção e disponibilidade.

Ao Laboratório de Solos do Instituto Agronômico de Campinas, pelas análises realizadas.

À Éder Valdir de Oliveira, colega querido, pela companhia, incentivo e conhecimento compartilhado.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos, por sua orientação e auxílio na elaboração deste trabalho.

À Wanderlei B. Machado, por toda sua dedicação e colaboração.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”  
(Albert Einstein)

## RESUMO

O presente trabalho apresenta resultados da aplicação do processo de eletroflotação no tratamento de efluentes gerado em viveiro florestal da indústria de produção de eucalipto. Devido à escassez de recursos hídricos para irrigação, principalmente nos dias de hoje, o reuso de efluentes tornou-se comum. No entanto, a simples reutilização do efluente sem tratamento, na irrigação de mudas de eucalipto, estava sendo prejudicial ao desenvolvimento das plantas, pois os sólidos suspensos presentes no efluente depositavam-se sobre as folhas, dificultando a realização da fotossíntese. No sentido de minimizar a quantidade de sólidos suspensos de tais efluentes, aplicou-se o processo de eletroflotação, o qual consiste basicamente por aplicar uma ddp (diferença de potencial) num conjunto de placas paralelas (em alumínio, com formato semelhante de um capacitor), estando este mergulhado no efluente. O campo elétrico resultante atua no efluente promovendo o processo de coagulação dos resíduos, e a formação de bolhas faz com que parte dele suba para a superfície, enquanto uma parte precipita. Os resultados apresentados referem-se às amostras coletadas no início e final de três tratamentos (com duração de aproximadamente uma hora) ao longo de um ano, onde analisou-se os parâmetros de DBO, DQO, turbidez, pH, condutividade elétrica, macronutrientes, micronutrientes e metais pesados. Os resultados mostram valores de redução de 80% em DBO, 95% em DQO, 99% em turbidez, indicando assim uma excelente alternativa para o tratamento deste tipo de efluente e seu adequado reuso para irrigação de mudas. Houve redução de 16% em média na condutividade elétrica do efluente tratado, indicando que sais e metais presentes no efluente foram removidos. As análises de macro e micronutrientes apresentam redução de concentração que variam de 15% para o sódio até 100% para o potássio. Em relação aos metais pesados observou-se remoção de 100% para os componentes chumbo e cromo. Observou-se também que ocorreu aumento no valor do pH de 7 para 9 em todos os efluentes tratados.

Palavras-chave: Eletroflotação, tratamento de efluente, produção de eucalipto.

## ABSTRACT

This assignment presents results in the electroflotation application process in the treatment of effluents generated in the eucalyptus seedling nursery production industry. Due to the shortage of hydric resources, mainly in present time, the effluents reuse to become common. However, the just reuse of effluent without treatment, for irrigation of eucalyptus seed, was being harmful to the plants growth, due to the accumulate of suspended solids on the leaves, hindering the photosynthesis. In order to minimize the suspended solids in these effluents, the electroflotation process was applied, which consist in the application of electric tension on set of parallel plaque (aluminum), inside of effluent. The resultant electric field act on effluent promoting the residues coagulation, and the formation of bubbles causes part of it to rise to the surface, while a part precipitates. The results refer to samples of the effluent collected in the beginning and the end of three treatments (with one hour of duration approximately) performed over one year which was analyzed parameters of BOD, COD, turbidity, pH, electric conductivity, macronutrients, micronutrients and contaminants. The results show 80% reduction in BOD, 95% for COD, 99% in turbidity, thus indicating an excellent alternative for the treatment of this type of effluent and adjusting the effluent for reuse in irrigation. There was an average reduction of 16% in the electric conductivity, indicating the removal of salts and metals. The macro and micronutrients analysis presents a reduction in their sodium to potassium concentration ranging from 15% to 100%. Regarding contaminants the removal for lead and chromium was observed in 100%. In all treated effluents there was an increase in the pH from 7 to 9.

**Keywords:** Electroflotation, effluent treatment, eucalyptus production.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da cadeia produtiva florestal.....	19
Figura 2: Porcentagem de terras cobertas com florestas em 2015.....	21
Figura 3: Países com maiores perdas e ganhos de áreas florestais (1990-2015).....	23
Figura 4: Fluxograma do processo produtivo de mudas de eucalipto.....	26
Figura 5: Matrizes de eucalipto no jardim clonal.....	27
Figura 6: (a) Seleção e coleta dos brotos (b) Plantio.....	28
Figura 7: (a) Casa de enraizamento (b) mudas já enraizadas.....	29
Figura 8: Casa de aclimatação.....	29
Figura 9: (a) Irrigação no pátio de crescimento e rustificação (b) muda pronta para expedição.....	30
Figura 10: Percentual do consumo de água no Brasil por setor.....	33
Figura 11: Regime trimestral de chuva no Brasil.....	36
Figura 12: Criticidade das chuvas de janeiro a março entre 2012 e 2014 no sudeste.....	37
Figura 13: Hidrólise do Alumínio em função do pH.....	41
Figura 14: Comparação entre processo o eletrolítico e lodos ativados no tratamento de esgotos sanitários.....	49
Figura 15: (a) Diagrama do reator (b) foto do reator com efluente ao final do tratamento.....	51
Figura 16: Tanque de armazenamento de efluente.....	52
Figura 17: Folha de eucalipto contendo manchas causadas pela irrigação com efluente não tratado.....	53
Figura 18: Folha de eucalipto irrigada com água de poço.....	53
Figura 19: Índice pluviométrico da região de Sorocaba.....	54
Figura 20: Efluente após 55 minutos de tratamento.....	55
Figura 21: Turbidez inicial e final dos efluentes tratados por eletroflotação.....	59

Figura 22: Valores de pH antes e após tratamento do efluentes por eletroflotação.....	60
Figura 23: Condutividade elétrica inicial e final dos efluentes tratados por eletroflotação.....	61
Figura 24: Valores iniciais e finais de $DBO_5$ para os efluentes tratados por eletroflotação.....	62
Figura 25: Valores iniciais e finais de DQO para os efluentes tratados por eletroflotação.....	62
Figura 26: Macronutrientes presentes no efluente antes e após tratamento por eletroflotação....	63
Figura 27: Micronutrientes presentes no efluente antes e após tratamento por eletroflotação....	64
Figura 28: Contaminantes presentes no efluente antes e após tratamento por eletroflotação.....	65
Figura 29: Solubilidade de hidróxidos e sulfetos metálicos na água em função do pH.....	66
Figura 30: Macronutrientes presentes no sobrenadante tratado no mês de setembro.....	67
Figura 31: Micronutrientes presentes no sobrenadante tratado no mês de setembro.....	67
Figura 32: Contaminantes presentes no sobrenadante tratado no mês de setembro.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Os cinco países com maior área florestal.....	22
Tabela 2: Países com maior redução de área florestal (2010-2015).....	22
Tabela 3: Quantidade de produtores de mudas de eucalipto em relação à quantidade de produtores de mudas registrados no RENASEM por estado.....	24
Tabela 4: Plantios florestais com eucalipto nos estados do Brasil 2006-2012.....	25
Tabela 5: Comparação de rotação e rendimento para fibra curta.....	25
Tabela 6: Consumo de água no Brasil por setor no ano de 2010.....	32
Tabela7: Sedes urbanas abastecidas por tipo de manancial.....	34
Tabela8: Demanda de água por estado brasileiro.....	35
Tabela 9: Condutividade elétrica de diferentes tipos de água.....	57
Tabela10: Faixa de concentração dos Macronutrientes na solução nutritiva.....	64
Tabela11: Faixa de concentração dos Micronutrientes na solução nutritiva.....	65
Tabela 12: Valores máximos permitidos para contaminantes e sua porcentagem no resíduo sólido tratado.....	68
Tabela 13: Valores das propriedades físico-químicas para o processo de eletroflotação aplicado à efluente de viveiro de mudas de eucalipto.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

ANA – Agência Nacional de Águas

BRACELPA – Sociedade Brasileira de Celulose e Papel

BTEX – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno

COT – Carbono Orgânico Total

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DEMBio – Departamento de Engenharia de Materiais e Bioprocessos

ddp – Diferença de Potencial

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

FEC – Faculdade de Engenharia Civil

FEQ – Faculdade de Engenharia Química

FisPol – Física de Polímeros

HPAs – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas

IBÁ – Indústria Brasileira da Árvore

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICP-OES – Espectroscopia de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPEF – Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais

MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

pH – Potencial de Hidrogênio

RENASEM – Registro Nacional de Sementes e Mudas

SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura

SFB – Serviço Florestal Brasileiro

TOG – Teor de Óleos e Graxas

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UV – Ultravioleta

## Sumário

Sumário .....	13
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Objetivo Principal .....	18
1.2.2 Objetivos Específicos .....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 A INDÚSTRIA FLORESTAL.....	19
2.1.1 A utilização das florestas e início do reflorestamento .....	20
2.1.2 Panorama atual das florestas .....	21
2.1.3 Processo produtivo em viveiros florestais .....	23
2.2 A ÁGUA NO BRASIL.....	31
2.2.1 Aspectos críticos ao abastecimento hídrico no Brasil.....	31
2.2.2 Captação e Utilização dos recursos hídricos no Brasil .....	32
2.2.3 Crise hídrica no sudeste brasileiro em 2014 .....	36
2.3 ELETROFLOTAÇÃO .....	39
2.3.1 Princípio da eletroflotação .....	39
2.3.2 Reações eletrolíticas.....	39
2.3.3 Estado da Arte .....	41
2.3.4 Fatores que afetam o processo.....	45
2.3.5 Limitações e vantagens da eletroflotação.....	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	51
3.1 Reator .....	51
3.2 Efluente .....	52
3.2.1 Períodos das Coletas .....	53

3.3 Procedimentos realizados durante tratamentos .....	54
3.4 Parâmetros analisados .....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1 Turbidez.....	59
4.2 pH .....	60
4.3 Condutividade elétrica .....	60
4.4 DBO <sub>5</sub> .....	61
4.5 DQO .....	62
4.6 Macronutrientes.....	63
4.7 Micronutrientes.....	64
4.8 Contaminantes .....	65
4.9. Sobrenadante .....	66
4.10 Resumo dos resultados .....	69
4.11 Análise de custo.....	70
4.11.1 Consumo de energia.....	70
4.11.2 Consumo do eletrodo.....	71
4.11.3 Custo da operação.....	72
5 CONCLUSÃO .....	74
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A preocupação com o uso consciente da água tem gerado mudança de hábitos em diversos ambientes, especialmente no setor industrial que, nas últimas décadas têm modificado os processos industriais para se adequarem às leis ambientais (BRASIL, 1997). Além disso, as alterações climáticas e a falta de recursos hídricos também têm contribuído para que formas alternativas de tratamento de efluentes sejam testadas e aprimoradas.

Neste contexto, analisou-se o processo de eletroflotação como alternativa para o tratamento de efluente de viveiro florestal, visando melhorar as condições de reutilização do mesmo.

O efluente proveniente de viveiros florestais é gerado em maior volume no processo de irrigação, onde parte da água utilizada não é absorvida pela planta e, ao ser drenada é captada por galerias e segue para tratamento ou reutilização. O reuso do efluente no processo de irrigação proporciona não só economia de água, mas também o reaproveitamento dos fertilizantes nele dissolvidos. Contudo, a cada passagem pelo processo o efluente torna-se mais turvo devido ao arraste de resíduos (areia, folhas, partículas de substrato, argila). E quando reutilizado sem tratamento o efluente ocasiona o acúmulo de sólidos sobre as folhas das plantas irrigadas prejudicando o desenvolvimento, pois diminui a área disponível para realização da fotossíntese. Desta forma, a aplicação de um tratamento que minimize os sólidos suspensos no efluente faz-se necessário para garantir a irrigação, principalmente nos períodos de estiagem, onde o efluente apresenta as piores condições.

Com base em trabalhos sobre tratamentos de efluentes utilizando eletroflotação desenvolvidos sob orientação do Prof. João Sinézio, da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em efluentes de indústria têxtil (CAMBOIM, 2010 e PEREIRA, 2007), indústria de papel e celulose (FERREIRA, 2006), os quais mostraram excelentes resultados, resolveu-se aplicar ao tratamento de efluente de viveiro florestal, pois este apresenta condições favoráveis para a aplicação da técnica de eletroflotação, principalmente devido à boa condutividade do efluente, ocasionada pela presença de sais fertilizantes, com valores entre 800 e 1200 $\mu$ S/cm.

Além disso, a eletroflotação apresenta outras vantagens como: facilidade de operação, estabilidade dos coágulos formados, não adição de produtos químicos e menor tempo de

retenção do efluente no reator, se comparado aos tratamentos convencionais (CAMBOIM, 2010). Essas vantagens são extremamente importantes para viabilizar economicamente a implantação do tratamento em empresas de pequeno porte, onde se enquadram a maioria dos viveiros florestais.

Outros pontos relevantes para a aplicação de estudos sobre tratamento de efluentes de viveiro florestal são: o grande volume de água utilizada no processo (cerca de 10 milhões de litros d'água para cada 1 milhão de mudas produzidas); a demanda crescente na produção de mudas (entre os anos de 2006 e 2012, foram necessários 2,7 trilhões de mudas de eucalipto, isso considerando apenas as novas áreas, ignorando os replantios que devem ocorrer a cada 7 anos em média); o baixo índice de reaproveitamento e tratamento do efluente (apenas 1/3 dos viveiros associados ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) trata o efluente, outro terço reutiliza e o restante faz estudo da viabilidade do tratamento) (SILVA, 2008) e, por fim, a escassez de informações sobre o desempenho de tratamentos alternativos, que se adequem às características deste tipo de indústria considerando sua sazonalidade e especificidade de seu efluente.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Principal**

Avaliação da aplicação da técnica de eletroflotação no tratamento de efluente de viveiro florestal por análise de remoção de sólidos suspensos, visando adequar o efluente tratado para reuso na irrigação de mudas de eucalipto.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar a turbidez do efluente após remoção de sólidos suspensos totais, sendo este parâmetro o mais importante para viabilizar a reutilização do efluente;
- Quantificar os parâmetros DQO (Demanda Química de Oxigênio) e da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) antes e após a eletroflotação;
- Analisar o resíduo flotado, visando o reaproveitamento dos nutrientes para as plantas (mudas).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão apresentadas: a indústria florestal, responsável pela geração do efluente em estudo; a água e finalmente, a eletroflotação, técnica aplicada para o tratamento do efluente.

### 2.1 A INDÚSTRIA FLORESTAL

Fazem parte da indústria florestal uma gama de empresas, investidores e empreendedores que atuam desde o fornecimento de insumos e máquinas específicas para a atividade florestal, passando pela prestação de serviços especializados como a produção e plantio de mudas, colheita de árvores e transporte de madeira até a transformação da madeira em bens intermediários e finais (AGUIAR, 2015). Abaixo segue um fluxograma da cadeia produtiva florestal.

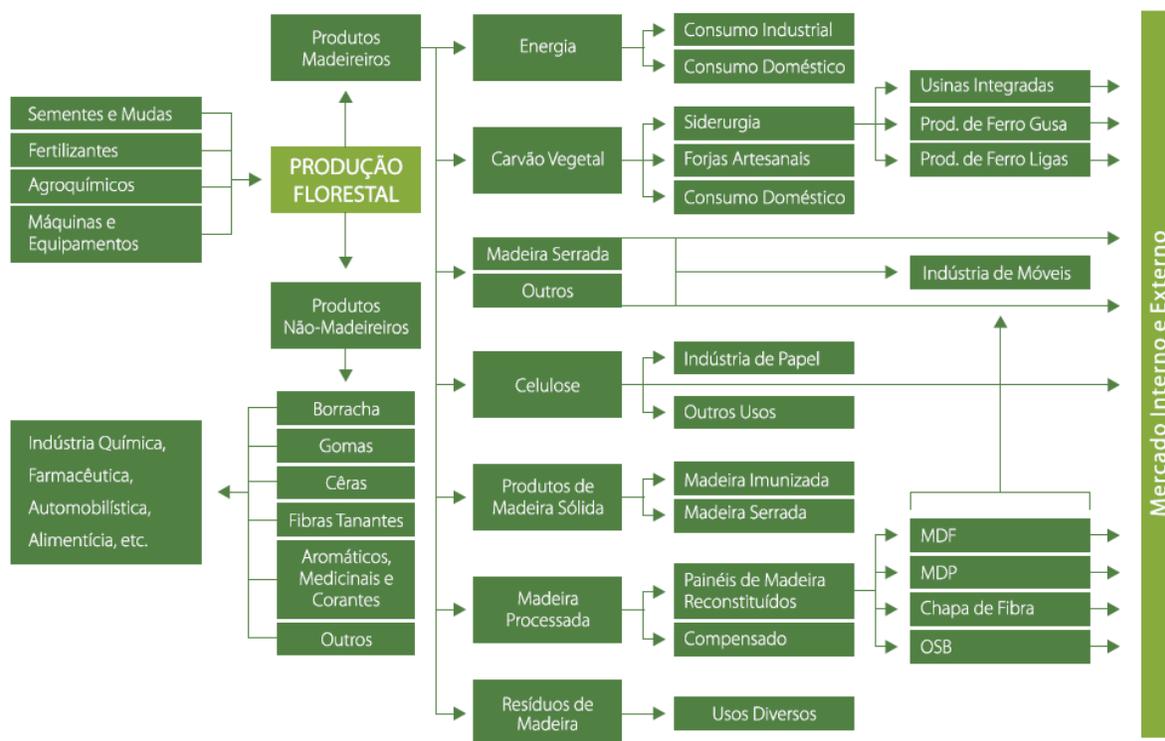


Figura 1: Fluxograma da cadeia produtiva florestal (STCP, 2009)

O mercado florestal tal qual existe hoje é resultado de anos de evolução, surgiu primeiramente da necessidade de madeira para construção civil e para lenha, mas hoje em dia engloba produtos diversos como: borracha, celulose, fármacos e outros.

O tópico abaixo traz um breve histórico de como a floresta foi explorada ao longo dos anos, sendo vista apenas como fonte de recursos e que, somente após apresentar indícios de escassez enxergou-se à necessidade de cultivá-la.

### **2.1.1 A utilização das florestas e início do reflorestamento**

A madeira está presente desde há muito tempo na vida do homem, e tem desempenhado importante papel no que diz respeito à qualidade de vida das civilizações no decorrer da história, foi matéria-prima fundamental na confecção de utensílios, ferramentas, navios e moradias. Importante fonte de calor, a madeira foi utilizada para cozinhar os alimentos e aquecer os invernos rigorosos. Seu uso como lenha e carvão vegetal, possibilitou a extração de metais das rochas e a fabricação de tijolo, cimento, cal, argamassas, telhas e vidro e, mais tarde o desenvolvimento da fundição de metais levou à utilização de grandes quantidades de madeira (LEÃO, 2000).

Em todas as épocas as florestas foram exploradas, em certos lugares de forma tão violenta que ocasionou a destruição total da floresta, levando a escassez de madeira que, por vezes esteve atrelada ao declínio econômico e social de inúmeras civilizações.

O primeiro reflorestamento que se tem registro com o objetivo de produzir madeira ocorreu na Inglaterra em 1580, onde foram plantados cinco hectares de carvalho no parque de Windsor. Depois, em 1689 na França foi estabelecido um decreto que obrigava proprietários de terras a reflorestarem 5% da área, sob pena de pagar multas pesadas caso não cumprissem (MORA e GARCIA, 2000).

Atualmente o eucalipto é o gênero mais cultivado em todo o mundo, com ocorrência natural na Austrália, suas primeiras plantações aconteceram por volta de 1850 na Espanha, Portugal e Índia (LEÃO, 2000).

Nos dias atuais, a floresta representa bem mais do que fonte de matéria prima, pois sabemos da importância delas no equilíbrio do clima e na produção de um bem indispensável à vida: a água.

Aborda-se no próximo item dados sobre a atual situação das florestas no mundo, para que mais adiante se compreenda como a indústria florestal interfere positivamente na preservação ambiental.

### 2.1.2 Panorama atual das florestas

Neste tópico serão abordados dados sobre a atual situação das florestas no mundo para que mais adiante se compreenda como a indústria florestal interfere positivamente na preservação das mesmas.

De acordo com a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), é considerada floresta toda “área medindo mais de 0,5 ha com árvores maiores que 5 m de altura e cobertura de copa superior a 10%, ou árvores capazes de alcançar estes parâmetros *in situ*. Sem incluir terra que está predominantemente sob uso agrícola” (FAO, 2004). Com base nesta definição apresentam-se os dados abaixo.

De acordo com os dados do relatório de 2015 (FAO, 2015) a área coberta por florestas no mundo corresponde a 3.999 milhões de hectares. Se comparada ao ano de 1990, onde a área florestal correspondia a 4.128 milhões de hectares, houve uma redução de mais de 3% nas florestas mundiais em 25 anos.

O mapa a seguir (Figura 2) mostra os diversos países e a porcentagem da área territorial coberta por florestas.



Figura 2: Porcentagem de terras cobertas com florestas em 2015 (FAO, 2015)

Em particular, o Brasil apresenta 58% do seu território coberto por florestas, o que corresponde a uma área de 493.538 mil hectares (FAO, 2015). Embora o Brasil figure em segundo lugar entre os cinco países com maior área de florestas do mundo (Tabela 1), foi também o país que mais desmatou nos últimos cinco anos, perdendo cerca de 984 mil hectares de florestas (Tabela 2).

Tabela 1: Os cinco países com maior área florestal (FAO, 2015)

	País	Área Florestal (mil ha)	% da Área do País	% da Área Mundial
1	Rússia	814931	48	20
<b>2</b>	<b>Brasil</b>	<b>493538</b>	<b>58</b>	<b>12</b>
3	Canadá	347069	35	9
4	EUA	310095	32	8
5	China	208321	22	5

Tabela 2: Países com maior redução de área florestal (2010-2015) (FAO, 2015)

	País	Área desmatada (mil ha)	% da Área em 2010
<b>1</b>	<b>Brasil</b>	<b>984</b>	<b>0,2</b>
2	Indonésia	684	0,7
3	Myanmar	546	1,7
4	Nigéria	410	4,5
5	Tanzânia	372	0,8

A seguir o mapa mostra os países e a relação entre ganhos e perdas de área florestal (Figura 3). O país com maior ganho de área florestal foi a China com 1.542 mil hectares.

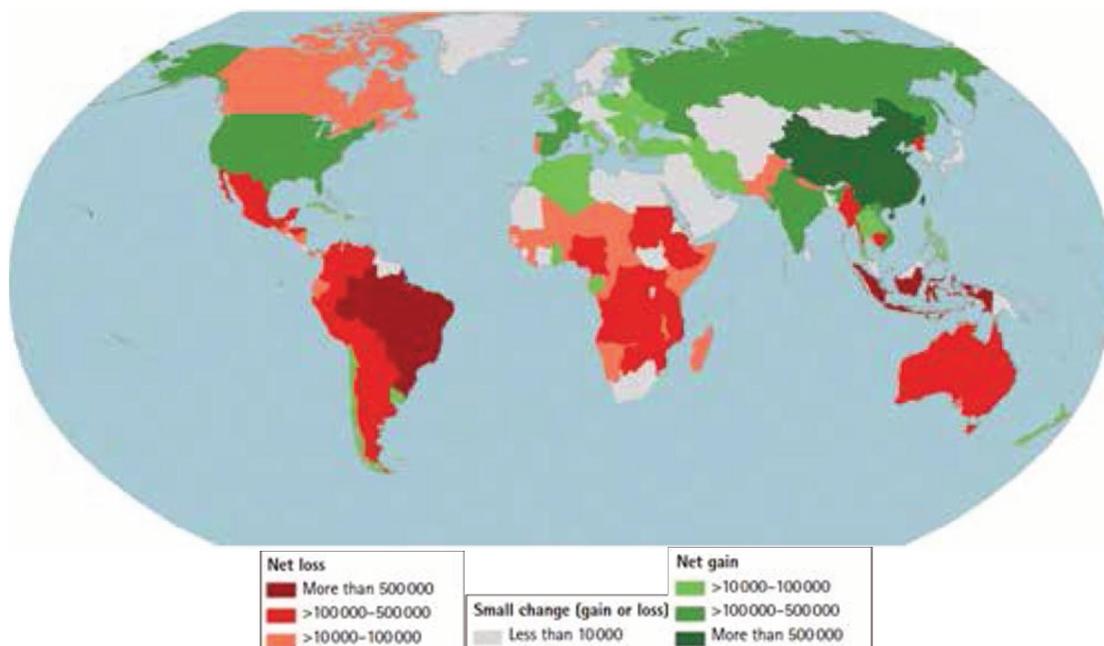


Figura 3: Países com maiores perdas e ganhos de áreas florestais (FAO, 2015)

Segundo relatórios da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) do ano de 2015, 91% da madeira utilizada para fins industriais vêm de reflorestamento, os outros 9% vem de florestas nativas legalmente manejadas, desta forma as florestas plantadas contribuem para a proteção do meio ambiente, evitando o desmatamento de florestas nativas, preservando a biodiversidade, recuperando áreas degradadas e contribuindo para a redução das emissões de gases do efeito estufa (AGUIAR, 2015).

Em 2014 o Brasil possuía 7,74 milhões de hectares de árvores plantadas, desse total 71,9% são plantios de eucalipto (AGUIAR, 2015). Dentre inúmeras espécies arbóreas o eucalipto tem sido uma das árvores mais plantadas no mundo em virtude de seu rápido crescimento, capacidade de adaptação, diversidade de espécies e produtividade (MORA e GARCIA, 2000).

### 2.1.3 Processo produtivo em viveiros florestais

Considerando os processos desenvolvidos no setor florestal, a produção de mudas é possivelmente um dos mais baratos e ao mesmo tempo mais importante, pois é fundamental na definição da produtividade e do destino final da madeira.

Não é possível dizer precisamente quantos viveiros florestais estão em funcionamento no Brasil, pois não há presença atuante de associações desse setor até o momento, mas em pesquisa realizada no Registro Nacional de Sementes e Mudanças (RENASSEM) foram encontrados registros de 5.947 produtores de mudas, dentre estes 1.424 produzem mudas de *Eucalyptus sp*, como mostra a Tabela 3. Ressalta-se que, principalmente pequenos produtores podem não possuir registro no RENASEM e, portanto os dados apresentados não retratam fielmente a realidade.

Tabela 3: Quantidade de produtores de mudas de eucalipto em relação à quantidade de produtores de mudas diversas registrados no RENASEM por estado (RENASSEM, 2015)

Região	Estados	Produtores		%
		Mudas diversas	Mudas de Eucalipto	
Norte	AC	15	5	33
	AM	66	1	2
	AP	3	1	33
	PA	107	23	21
	RO	98	28	29
	RR	7	1	14
	TO	30	10	33
	<b>Subtotal</b>	<b>326</b>	<b>69</b>	<b>21</b>
Nordeste	AL	15	1	7
	BA	244	32	13
	CE	179	21	12
	MA	14	7	50
	PB	40	1	3
	PE	59	5	8
	PI	39	12	31
	RN	44	6	14
	SE	71	2	3
<b>Subtotal</b>	<b>705</b>	<b>87</b>	<b>12</b>	
Centro-Oeste	DF	20	7	35
	GO	143	51	36
	MS	48	19	40
	MT	56	21	38
	<b>Subtotal</b>	<b>267</b>	<b>98</b>	<b>37</b>
Sudeste	ES	543	140	26
	MG	1791	646	36
	RJ	51	7	14
	SP	1112	116	10
	<b>Subtotal</b>	<b>3497</b>	<b>909</b>	<b>26</b>
Sul	PR	408	189	46
	RS	321	24	7
	SC	423	48	11
	<b>Subtotal</b>	<b>1152</b>	<b>261</b>	<b>23</b>
<b>Total Brasil</b>	<b>5947</b>	<b>1424</b>	<b>24</b>	

Também não foi possível localizar registros e acompanhamentos de capacidade produtiva de viveiros. Sabe-se que a área de florestas plantadas está em crescimento contínuo, como mostra a Tabela 4, e que para atender ao mercado de florestas plantadas estima-se que sejam necessárias cerca de 1 bilhão de mudas para cada 500 mil hectares (SBS, 2013).

Tabela 4: Plantios florestais com eucalipto no Brasil 2006-2012 (ABRAF, 2013)

UF	Plantio de Eucalipto (ha)						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
MG	1.181.429	1.218.212	1.278.210	1.300.000	1.400.000	1.401.787	1.438.971
SP	915.841	911.908	1.001.080	1.029.670	1.044.813	1.031.677	1.041.695
PR	121.908	123.070	142.430	157.920	161.422	188.153	197.835
BA	540.172	550.127	587.610	628.440	631.464	607.440	605.464
SC	70.341	74.008	77.440	100.140	102.399	104.686	106.588
RS	184.245	222.245	277.320	271.980	273.042	280.198	284.701
MS	119.319	207.687	265.250	290.890	378.195	475.528	587.310
ES	207.800	208.819	210.410	204.570	203.885	197.512	203.349
PA	115.806	126.286	136.290	139.720	148.656	151.378	159.657
MA	93.285	106.802	111.120	137.360	151.403	165.717	173.324
GO	49.637	51.279	56.880	57.940	58.519	59.624	38.081
AP	58.473	58.874	63.310	62.880	49.369	50.099	49.506
MT	46.146	57.151	58.580	61.530	61.950	58.843	59.980
TO	13.901	21.655	31.920	44.310	47.542	65.502	109.000
PI	-	-	-	-	37.025	26.493	27.730
Outros	27.491	31.588	27.580	28.380	4.650	9.314	18.838
<b>Total</b>	<b>3.745.794</b>	<b>3.969.711</b>	<b>4.325.430</b>	<b>4.515.730</b>	<b>4.754.334</b>	<b>4.873.951</b>	<b>5.102.029</b>

Desta forma, entre os anos de 2006 a 2012 somaram-se aos plantios já existentes mais 1.356.235 ha de novas áreas, sendo necessárias aproximadamente 2,7 trilhões de mudas de eucalipto, considerando somente os novos plantios. As áreas já florestadas necessitam de novo replante ao fim de cada período de rotação, correspondente a cerca de sete anos como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Comparação de rotação e rendimento para fibra curta (BRACELPA, 2014)

Espécie	País	Rotação (anos)	Rendimento (m <sup>3</sup> /ha/ano)
Eucalipto	Brasil	7	44
Eucalipto	África do Sul	7-10	20
Eucalipto	Chile	10-12	25
Eucalipto	Portugal	12-15	12
Eucalipto	Espanha	12-15	10
Bétula	Suécia	35-40	6
Bétula	Finlândia	35-40	4

Os sistemas para produção de mudas mais utilizados no Brasil são: Via seminal e via propagação vegetativa (EMBRAPA, 2003). Em pesquisa realizada pelo IPEF (SILVA, 2008), dos quatorze viveiros pesquisados, 85% produziam mudas via propagação vegetativa e 15% via seminal.

No método de produção via seminal, as sementes obtidas de plantios comerciais, áreas de produção ou pomares melhorados geneticamente (através de seleções), são semeadas em tubetes (recipientes plásticos) contendo o substrato, os tubetes são encaixados nas bandejas, as quais são dispostas em fileiras na casa de vegetação onde as sementes germinarão e seguirão o mesmo processo das mudas produzidas via propagação vegetativa, a qual é explicada com mais detalhes no tópico seguinte.

### 2.1.3.1 Etapas da produção de mudas de eucalipto via propagação vegetativa

A produção de mudas de *Eucalyptus sp.* em viveiros florestais através da propagação vegetativa é realizada na grande maioria pelo uso da técnica da miniestaquia, que consiste na multiplicação de genótipos desejáveis através da utilização de brotações de plantas matrizes para a obtenção de novas plantas.

Na Figura 4 está o fluxograma simplificado da produção de mudas de eucalipto e a seguir a descrição das principais etapas.

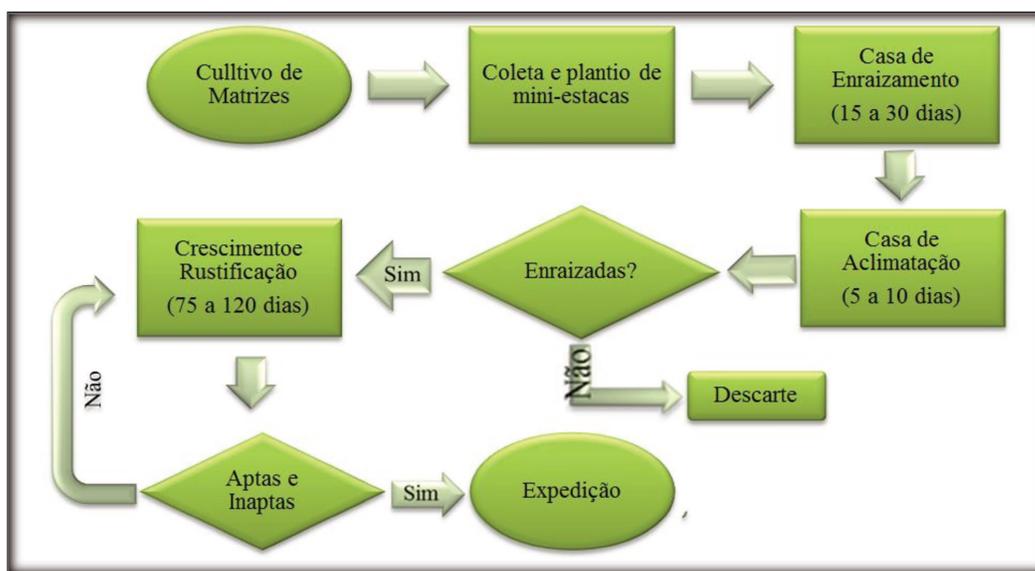


Figura 4: Fluxograma do processo produtivo de mudas de eucalipto

## **Seleção de Material para propagação**

Os aspectos mais importantes a serem considerados na seleção de material para propagação (matrizes) são os produtivos (alto volume de madeira), em seguida os aspectos qualitativos (boa forma, derrama natural, galhos finos, casca fina), os silviculturais (bons índices de enraizamento) e de resistência às doenças, pragas e condições adversas do meio.

A seleção das matrizes é feita em talhões já estabelecidos, onde a escolha do material varia de acordo com o uso que se pretende para a madeira. Há também opções de materiais híbridos (matrizes geradas através de polinização controlada) onde a combinação de diferentes espécies dá origem a materiais com características desejáveis de ambas as espécies.

## **Cultivo de Matrizes**

As matrizes selecionadas são então plantadas em areia no jardim clonal, em canteiros suspensos de alvenaria como mostra a Figura 5. No jardim clonal as matrizes recebem controle hídrico, nutricional, fitossanitário e manejo adequado (poda), para uma melhor produtividade. Nesta etapa o adubo e a água drenados não são reaproveitados devido ao risco de propagação de doenças.



Figura 5: Matrizes de eucalipto no jardim clonal

## Coleta de miniestacas

A coleta de miniestacas (brotações) é realizada semanalmente em cada matriz e de forma seletiva, ou seja, colhendo-se somente as brotações que se enquadram nos padrões desejados, os quais variam de acordo com a espécie, mas via de regra devem ter entre 3 e 5 cm de comprimento e conter de um a três pares de folhas (Figura 6). No momento da colheita as miniestacas têm as folhas recortadas ao meio para diminuir a evapotranspiração e são imediatamente acondicionadas em recipientes com água, para que possam chegar ao local de enraizamento em perfeitas condições de turgor. O período entre a coleta e o plantio das miniestacas no substrato, deverá ser o mais reduzido possível, sendo recomendados intervalos inferiores a 15 minutos.



Figura 6: (a) Seleção e coleta dos brotos (b) Plantio

## Enraizamento das miniestacas

Depois de plantadas, as miniestacas são levadas para a casa de vegetação, onde permanecem para que ocorra o enraizamento (Figura 7). A casa de vegetação é uma estufa com nebulização intermitente de água, para manter o ambiente com umidade acima de 80%, com temperatura variando preferencialmente de 30 a 35°C e com luminosidade controlada. Essas condições são propícias ao enraizamento das miniestacas em um período que varia de 15 a 30 dias dependendo da espécie cultivada.

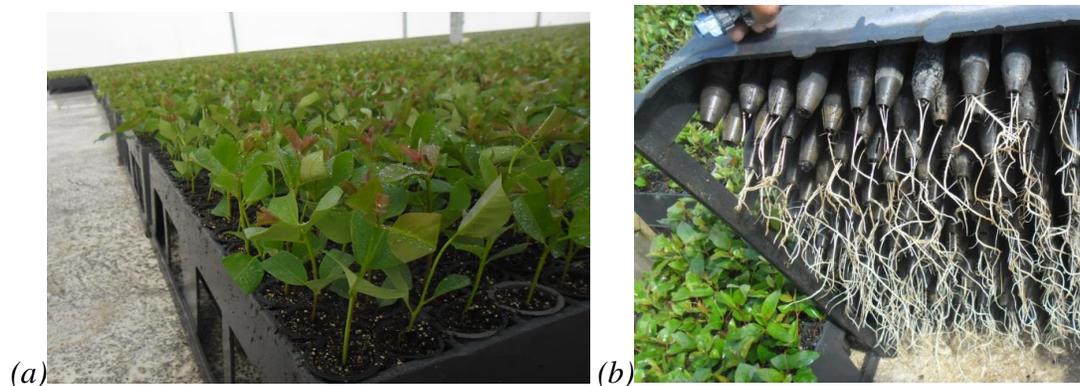


Figura 7: (a) Casa de enraizamento (b) Mudas já enraizadas

### **Aclimação**

Posteriormente ao enraizamento as mudas são levadas para a casa de sombra (ambiente de aclimação) com irrigação, adubação e luminosidade controlada onde as mudas permanecem de 5 a 10 dias, como mostra a Figura 8.



Figura 8: Casa de aclimação

### **Crescimento e rustificação**

Na sequência as mudas são levadas para os pátios a pleno sol (Figura 9), onde são descartadas as miniestacas que não enraizaram e é realizado o espaçamento das mudas, para que as mesmas tenham condições de crescer saudáveis. Nesta fase as mudas são irrigadas de duas a quatro vezes por dia e também recebem adubação para suprir as necessidades nutricionais. As mudas ficam aptas ao plantio no campo com idade variando entre 75 a 120 dias.

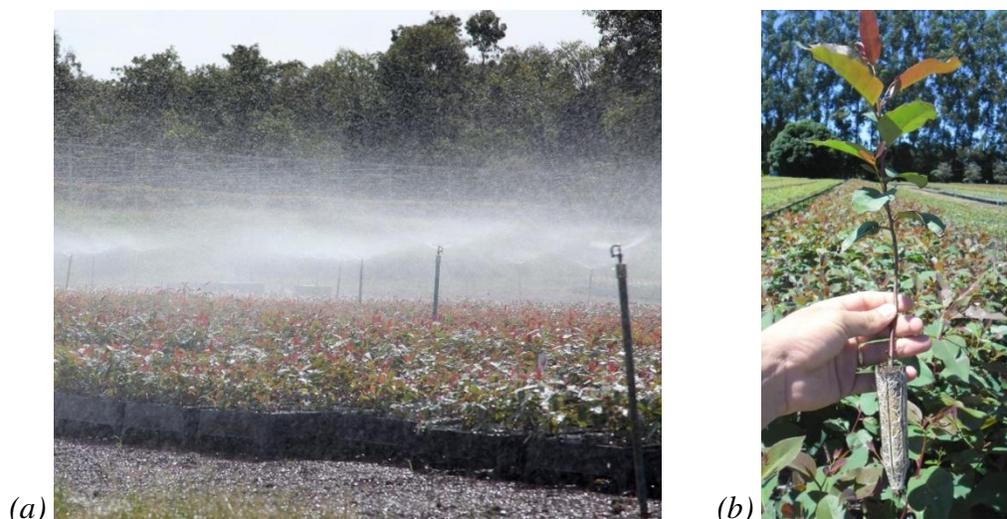


Figura 9: (a) Irrigação no pátio de crescimento e rustificação (b) Muda pronta para expedição

### 2.1.3.2 Consumo de água em viveiros florestais

A principal fonte de água para viveiros florestais são os poços artesianos, mas outras fontes também são utilizadas, como represas, lagoas, cursos d'água e água tratada (IPEF, 2008). Há também viveiros que utilizam cisternas, captando e armazenando água da chuva para utilizar no processo, como é o caso do viveiro cujo efluente foi estudado. A utilização de cisternas ocorre principalmente em regiões onde não há disponibilidade de água em volume suficiente para o processo.

O consumo de água em viveiros florestais varia de acordo com a espécie e com o método, sendo que para produzir cerca de um milhão de mudas de eucalipto via propagação vegetativa são consumidos aproximadamente 3 milhões de litros de água por mês, e o tempo estimado para produção de eucalipto está entre 75 e 120 dias, ou seja, para cada milhão de mudas, consome-se em média 10 milhões de litros d'água.

Em relação ao efluente gerado na produção de mudas, grande parte do volume origina-se no processo de irrigação, onde a água que esco das bandejas são drenadas através de canaletas. Esse efluente muitas vezes não é reaproveitado no processo, como revela pesquisa realizada pelo IPEF (2008), em que apenas um terço dos viveiros pesquisados realiza o tratamento do efluente, outro terço reutiliza e o restante dos viveiros pesquisados faz estudo da viabilidade do tratamento.

Em virtude da demanda por mudas, os viveiros florestais passaram por grandes modificações nos últimos 20 anos, os avanços tecnológicos, principalmente na qualidade fisiológica das mudas e no menor consumo de insumos, são reflexos do investimento científico. Contudo nota-se que pouco se investe em gerenciamento de recursos hídricos e tratamento de efluentes, assunto que num futuro muito próximo serão essenciais para garantir a sustentabilidade do setor.

## **2.2 A ÁGUA NO BRASIL**

O extenso território brasileiro engloba ecossistemas distintos, com características que vão do semiárido (região onde a precipitação média é 500 mm/ano) a regiões alagadas (com precipitação média anual de mais de 3000 mm/ano), com farto potencial de recursos hídricos. Não obstante a essa distinção de climas há ainda o fator demográfico, onde aglomerados urbanos como a região metropolitana de São Paulo concentram cerca de 20 milhões de habitantes, cidades da região Norte, onde há maior concentração de recursos hídricos, apresentam os menores índices demográficos do país, com menos de 0,15 hab/ km<sup>2</sup>.

Segundo dados da FAO (2010) 98% da população brasileira tem acesso à água tratada, aparentemente é um bom percentual, no entanto, 2% da população brasileira, (considerando dados de 2010) são quase 4 milhões de pessoas sem acesso à água tratada.

### **2.2.1 Aspectos críticos ao abastecimento hídrico no Brasil**

De acordo com relatório da Agência Nacional de Águas (ANA) do ano de 2010, os principais aspectos críticos que necessitam serem superados para que haja garantia de abastecimento hídrico à população são:

- Oferta de água em quantidade insuficiente para o atendimento da demanda, devido à distribuição espacial irregular dos recursos hídricos, à baixa produção hídrica de mananciais utilizados em períodos de estiagem, e à deficiência de investimentos para aproveitamento de novos mananciais;

- Abastecimento intermitente, provocado pela produção de água em quantidades inferiores às demandas, em função da precariedade e deterioração dos sistemas de captação, adução e tratamento de água e de elevados índices de perdas;

- Ocorrência de águas poluídas devido, em grande parte, à inexistência ou ineficiência de sistemas de coleta e tratamento de esgotos sanitários e de outras medidas de proteção de mananciais, com implicações negativas para o atendimento da demanda por água para diversos usos, em particular o abastecimento humano;

- Conflitos existentes e potenciais pelo uso da água, associados a mananciais e sistemas que atendem a mais de um município ou setor usuário e que, normalmente, abrangem transferências hídricas entre bacias hidrográficas, cujo processo de planejamento e tomada de decisão requer estratégias diferenciadas e ações coordenadas para a viabilização de empreendimentos e recursos (ANA, 2010).

## 2.2.2 Captação e Utilização dos recursos hídricos no Brasil

Além do abastecimento urbano, a água é utilizada na produção agrícola (setor que utiliza mais de 50% do consumo total), na agropecuária e no setor industrial, onde a água faz parte da maioria dos processos produtivos. Na Tabela 6 estão os volumes anuais de consumo de água no Brasil no ano de 2010, divididos em quatro setores principais (FAO, 2010). E, na Figura 10, a representação percentual de cada setor.

Tabela 6: Consumo de água no Brasil por setor no ano de 2010 (FAO, 2010)

<b>Setor</b>	<b>Consumo</b> (milhões m <sup>3</sup> / ano)
Agricultura	40.410
Pecuária	4.490
Municípios	17.210
Indústrias	12.720
<b>Total</b>	<b>74.830</b>

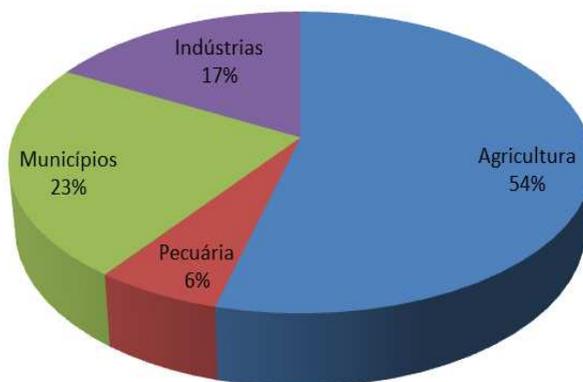


Figura 10: Percentual do consumo de água no Brasil por setor (FAO, 2010)

Em relação ao tipo de captação de água, dos 5.565 municípios 47% são abastecidos exclusivamente por mananciais superficiais, 39% por águas subterrâneas e 14% dos municípios utilizam tanto águas superficiais quanto subterrâneas (abastecimento misto), como mostra a Tabela 7.

Em São Paulo, mais de 50% dos municípios são abastecidos por águas subterrâneas, estes municípios, no entanto, localizam-se majoritariamente a oeste do estado, desta forma, os mananciais superficiais são essenciais para o abastecimento da região metropolitana e de cidades com maior densidade demográfica (ANA, 2010).

Tratando-se de mananciais superficiais, o rio Piracicaba e seus afluentes (Jaguarí, Jacareí, Atibaia, Atibainha, Cachoeira e Camanducaia), compõe o sistema de represas Cantareira, responsável pelo abastecimento de aproximadamente metade da população da região metropolitana de São Paulo, fornecendo uma vazão de 40 m<sup>3</sup>/s para 29 cidades.

Outros dois sistemas de represas fornecem juntos uma vazão de 31m<sup>3</sup>/s para a região metropolitana de São Paulo. O primeiro formado pelas represas Guarapiranga, Billings e Braço do Rio Grande (21m<sup>3</sup>/s) e o segundo pelas represas Paraitinga, Birituba-Mirim, Ponte Nova, Jundiaí e Taiaçupeba (10m<sup>3</sup>/s).

Tabela7: Sedes urbanas abastecidas por tipo de manancial (ANA, 2010)

Região	Estados	Tipo de abastecimento				Total de municípios na UF
		Misto	Subterrâneo	Superficial	Sem informação	
Norte	AC	2	4	16	0	22
	AM	8	44	10	0	62
	AP	2	4	10	0	16
	PA	13	108	21	1	143
	RO	5	10	37	0	52
	RR	5	9	1	0	15
	TO	10	84	45	0	139
	<b>Subtotal</b>	<b>45</b>	<b>263</b>	<b>140</b>	<b>1</b>	<b>449</b>
Nordeste	AL	11	16	75	0	102
	BA	32	78	307	0	417
	CE	12	64	108	0	184
	MA	11	158	43	5	217
	PB	17	34	165	7	223
	PE	14	17	153	1	185
	PI	8	174	40	2	224
	RN	3	76	85	3	167
	SE	8	20	47	0	75
<b>Subtotal</b>	<b>116</b>	<b>637</b>	<b>1023</b>	<b>18</b>	<b>1794</b>	
Centro-Oeste	DF	1	0	0	0	1
	GO	38	56	152	0	246
	MS	8	62	8	0	78
	MT	20	58	61	2	141
	<b>Subtotal</b>	<b>67</b>	<b>176</b>	<b>221</b>	<b>2</b>	<b>466</b>
Sudeste	ES	7	0	71	0	78
	MG	171	170	512	0	853
	RJ	11	1	77	3	92
	SP	126	331	184	4	645
	<b>Subtotal</b>	<b>315</b>	<b>502</b>	<b>844</b>	<b>7</b>	<b>1668</b>
Sul	PR	89	221	86	3	399
	RS	67	286	134	9	496
	SC	58	68	165	2	293
	<b>Subtotal</b>	<b>214</b>	<b>575</b>	<b>385</b>	<b>14</b>	<b>1188</b>
<b>Total Brasil</b>		<b>757</b>	<b>2153</b>	<b>2613</b>	<b>42</b>	<b>5565</b>

Observando a demanda de água por estado (Tabela 8) nota-se que os sistemas de represas citados acima, os quais abastecem a região metropolitana de São Paulo representam mais de 50% da demanda hídrica do estado de São Paulo. Deve-se ressaltar que há forte interdependência entre os mananciais que abastecem conjuntamente as regiões metropolitanas de São Paulo, Baixada Santista e Campinas (ANA, 2010).

Ressalta-se, portanto, o papel fundamental das águas superficiais no abastecimento urbano, e o quão é necessária a proteção dos mananciais, buscando-se continuamente o controle das fontes poluidoras.

Tabela 8: Demanda de água por estado brasileiro (ANA, 2010)

Região	Estados	Demanda 2015 (m <sup>3</sup> /s)	% do Total
Norte	AC	3,4	0,6
	AM	13,4	2,4
	AP	2,3	0,4
	PA	17,1	3,0
	RO	3,7	0,6
	RR	1,6	0,3
	TO	3,6	0,6
	<b>Subtotal</b>	<b>45,1</b>	<b>7,9</b>
Nordeste	AL	8,1	1,4
	BA	36,5	6,4
	CE	22,9	4,0
	MA	14,7	2,6
	PB	9,1	1,6
	PE	24,2	4,2
	PI	7,2	1,3
	RN	8,3	1,5
	SE	5,2	0,9
	<b>Subtotal</b>	<b>136,2</b>	<b>23,9</b>
Centro-Oeste	DF	9,7	1,7
	GO	16,2	2,8
	MS	6	1,1
	MT	7,4	1,3
	<b>Subtotal</b>	<b>39,3</b>	<b>6,9</b>
Sudeste	ES	10,4	1,8
	MG	50,5	8,9
	RJ	72,5	12,7
	SP	141,2	24,8
	<b>Subtotal</b>	<b>274,6</b>	<b>48,2</b>
Sul	PR	26,4	4,6
	RS	32,4	5,7
	SC	16,2	2,8
	<b>Subtotal</b>	<b>75</b>	<b>13,2</b>
<b>Total Brasil</b>		<b>570,2</b>	<b>100,0</b>

### 2.2.3 Crise hídrica no sudeste brasileiro em 2014

O ano de 2014 foi marcado pela grande escassez de recursos hídricos, especialmente na região sudeste do país. Desde 2012 observa-se uma queda intensa e gradativa na quantidade de chuvas em algumas regiões do Brasil, prejudicando o abastecimento de centros urbanos e inviabilizando atividades setoriais como agricultura irrigada e hidrelétricas (ANA, 2014).

Considerando dados de monitoramentos desde 1930, tem-se uma média do regime de chuvas no Brasil (Figura 11), os quais estão agrupados por trimestres.

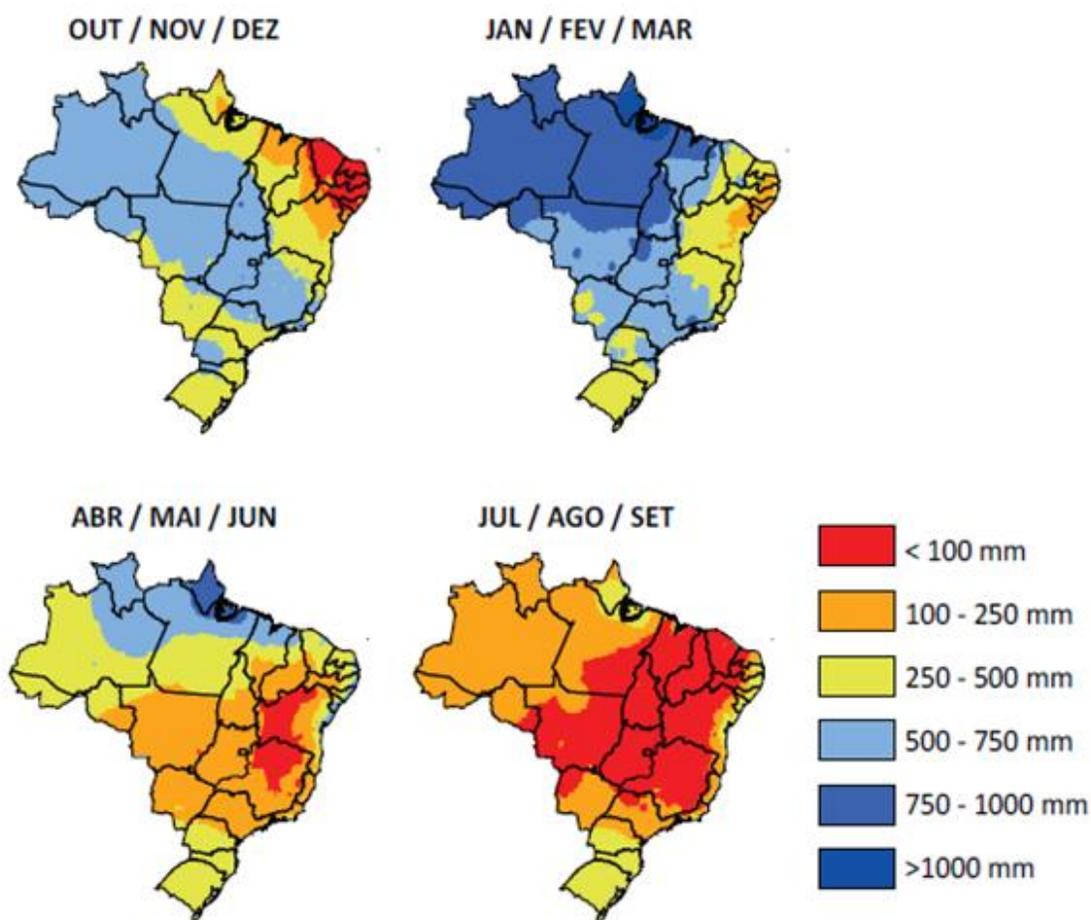


Figura 11: Regime trimestral de chuva no Brasil (ANA, 2014)

Comparando-se a Figura 11, acima, que mostra a pluviosidade média na região sudeste (500-750 mm) para os meses de janeiro, fevereiro e março, com a Figura 12, a seguir, a qual apresenta a criticidade das chuvas, observa-se que, em 2014, grande parte da região

registrou menos de 5% da precipitação média comum para o período, e que a projeção realizada (com base em dados estatísticos) mostra que o período de retorno pode ser superior a 100 anos, dado o grau de excepcionalidade do evento.

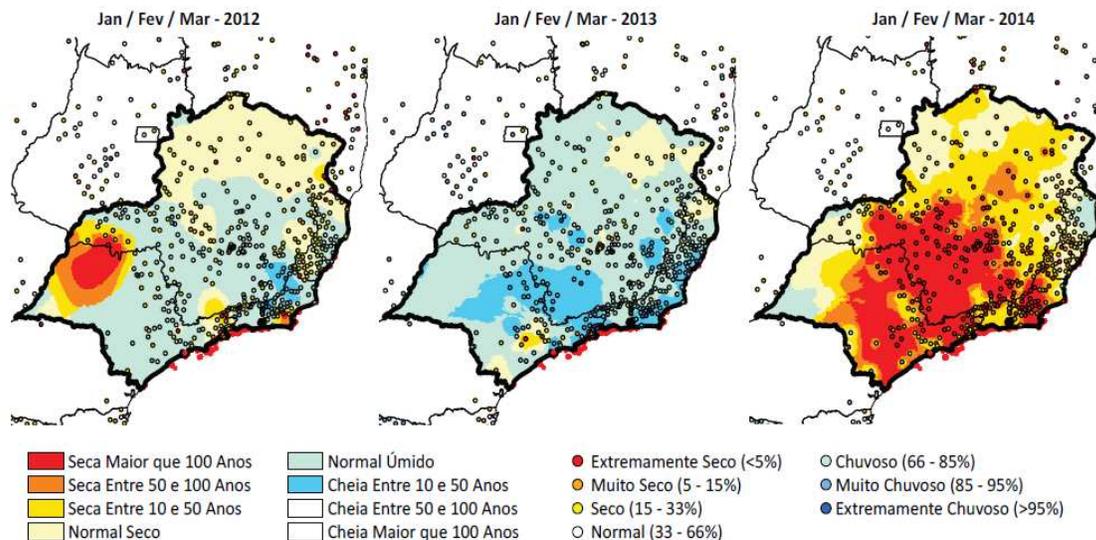


Figura 12: Criticidade das chuvas de janeiro a março entre 2012 e 2014 no sudeste (ANA, 2014)

Em 2014, o sudeste do Brasil apresentou o regime de chuvas mais adverso de todos os anos que se tem registro, onde 25% das estações de monitoramento registraram índice pluviométrico entre os 3 mais baixos dos últimos 50 anos, observando dados especificamente do estado de São Paulo, o total de estações com índices entre os mais baixos sobe para 50%, sendo que em 30% das estações foi o período mais seco já registrado (ANA, 2014).

A redução do índice pluviométrico entre os anos de 2012 a 2014, na região sudeste, fenômeno natural, portanto imprevisível, ainda não tem as causas dessa alteração climática especificada. No entanto, a escassez de chuvas é apenas mais um fator que contribuiu para agravar a crise hídrica, somados a esse fator tem-se a má gestão dos recursos hídricos (demanda e disponibilidade) e poluição dos mananciais.

Um diagnóstico das principais bacias que abastecem as regiões brasileiras mostra que, independente da ocorrência ou não de fatores extremos, muitas delas não estão aptas a atender à demanda, seja devido a qualidade ou quantidade dos recursos. Dessa avaliação realizada pela ANA (2014), tem-se que:

As bacias hidrográficas Amazônica, Tocantins - Araguaia e Paraguai, onde a demanda de água é inferior às demais regiões, encontram-se em condição satisfatória quanto à quantidade e qualidade de recursos hídricos.

A região nordeste, possui grande quantidade de rios com criticidade quantitativa devido à baixa disponibilidade hídrica dos corpos d'água.

As bacias Piracicaba, Capivari e Jundiá, Paraíba do sul e Alto Tietê, localizadas em regiões metropolitanas, apresentam criticidade quali-quantitativa, devido à alta demanda de água e à grande quantidade de carga orgânica lançada em seus rios.

No sul do Brasil muitos rios possuem criticidade quantitativa em decorrência da grande demanda para irrigação (arroz inundado).

Segundo a ANA (2014) é necessário o investimento em infraestrutura, para garantir maior capacidade de armazenamento e de acesso à água, mas sobretudo é necessária uma mudança de atitude, como mostra o parágrafo retirado do Informe 2014 sobre a crise hídrica.

## **2.3 ELETROFLOTAÇÃO**

A eletroflotação foi patenteada em 1887 por Eugene Hermite (HERMITE, 1888), desde então vem passando por aperfeiçoamentos, os quais permitiram seu uso no tratamento de diversos efluentes.

### **2.3.1 Princípio da eletroflotação**

O princípio da eletroflotação consiste em aplicar uma diferença de potencial (ddp) em eletrodos que se encontram submersos em uma solução líquida. Para uma adequada ddp entre os eletrodos haverá a dissociação dos íons presentes na água e para eletrodos não inertes são produzidos íons metálicos em decorrência da oxidação do ânodo, os quais serão responsáveis pela coagulação das partículas presentes na solução líquida (efluente). Dentre as reações, originadas pela aplicação da ddp, ocorre a formação de gases e coagulação de sólidos em suspensão, sendo que os gases impulsionam os elementos coagulados para a superfície do efluente, como também pode ocorrer precipitação de coagulados.

Segundo CERQUEIRA (2006) o tratamento com eletroflotação acontece em três etapas sucessivas, são elas: a eletrocoagulação, a eletrofloculação e a eletroflotação, que são descritas a seguir:

-Eletrocoagulação: Formação de um agente coagulante através da oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício (alumínio), ocasionando a neutralização das cargas superficiais, a desestabilização das partículas coloidais e a quebra de emulsões.

-Eletrofloculação: Aglutinação das partículas desestabilizadas pelos hidróxidos de alumínio, que são coagulantes naturais favorecendo a formação e o crescimento dos flocos.

-Eletroflotação: Geração de microbolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo, que sobem à superfície colidindo e sendo adsorvidas pelos flocos, carregando por arraste as partículas e impurezas em suspensão no meio e promovendo desta forma a clarificação do efluente.

### **2.3.2 Reações eletrolíticas**

As leis que regem a eletrólise foram formuladas por Michael Faraday (1791-1867) e relacionam quantitativamente a carga elétrica que atravessa o sistema e a massa das substâncias geradas.

“1ª Lei de Faraday: A massa ( $m$ ) de determinada substância, formada ou transformada por eletrólise é diretamente proporcional à carga elétrica ( $Q$ ) que atravessa o sistema de um eletrodo a outro.”

“2ª Lei de Faraday: A massa ( $m$ ) de determinada substância, formada ou transformada por eletrólise, na passagem de uma carga elétrica ( $Q$ ) entre eletrodos é diretamente proporcional ao equivalente-grama ( $E$ ) desta substância.”

Então é possível calcular a massa da substância que será formada durante a eletrólise devido à passagem de uma carga utilizando a equação (1):

$$M = Q_{(C)} \cdot E_{(eq)} / 96500_{(C)} \quad (1)$$

Onde:

M= massa (g)

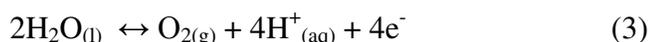
Q= carga (C)

E= equivalente grama (g)

96500 C = 1F

As reações que ocorrem no processo de eletroflotação quando utilizados eletrodos de alumínio são as seguintes:

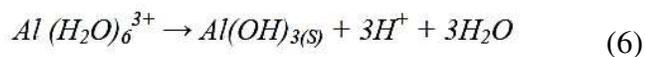
**Reações no ânodo:**



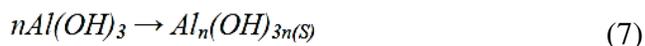
**Reações no cátodo:**



**Formação do agente coagulante:**



**Reações secundárias:**



Dependendo do pH do meio outros complexos de alumínio podem ser formados, como mostra a Figura 13.

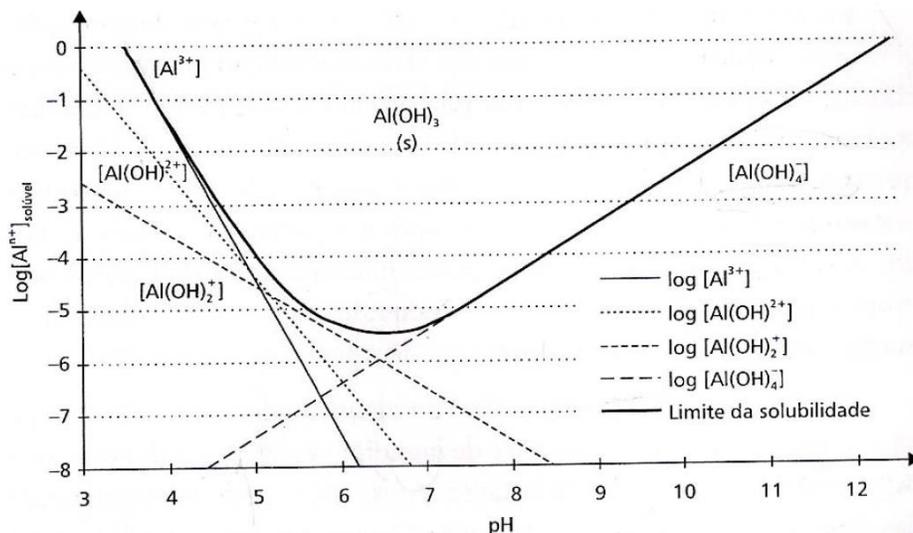


Figura 13: Hidrólise do Alumínio em função do pH (CRESPILHO E REZENDE, 2004)

### 2.3.3 Estado da Arte

Abaixo estão listados estudos recentes sobre o desempenho da eletroflotação no tratamento de efluentes de indústrias diversas.

**Indústria Têxtil:** Ensaios realizados com eletrodos de aço inox, ferro e alumínio foram utilizados para verificar a eficiência da eletroflotação na remoção da cor do efluente, onde o eletrodo de aço inox teve rendimento muito baixo na remoção da cor (<30%) e o eletrodo de alumínio foi o que apresentou os melhores resultados, alcançando 92% na remoção de cor (CAMBOIM, 2010). Estudos realizados por PEREIRA (2007) verificou a aplicação da eletroflotação em efluentes têxteis utilizando eletrodos de alumínio e demonstrou que a eficiência na remoção de cor depende das características do efluente, sendo que para as mesmas condições de operação um efluente alcançou a cor desejada em 40 minutos enquanto o outro após 4 horas de tratamento havia alcançado apenas 50% na remoção da cor. CERQUEIRA (2006) avaliou a eficiência na redução de cor, turbidez e DQO de efluente têxtil utilizando eletrodos de ferro e alumínio, onde os melhores resultados alcançados foram de 70% DQO, 81% de cor e 93% de turbidez para o eletrodo de alumínio utilizando intensidade de corrente de 3 A

e, 61% DQO, 95% de cor e 96% de turbidez para o eletrodo de ferro utilizando intensidade de corrente de 5 A. FLOSS e CALLEGARO (2011) utilizaram eletrodos de ferro no tratamento de efluente têxtil, avaliação a variação do pH, tempo de reação e intensidade de corrente.

Indústria Alimentícia: ESFANDYARI (2014) avaliou a remoção de poluentes do efluente oriundo da produção de azeite de oliva utilizando eletrodos de alumínio e pares de aço inox e RuO<sub>2</sub>/Ti, variando o pH, a densidade de corrente e o tempo de detenção, sendo que os melhores resultados foram alcançados em pH 4, densidade de corrente de 40 mA/cm<sup>2</sup> e tempo de detenção de 30 minutos. ARAYA-FARIAS, MONDOR e LAMARCHE (2007) testaram diferentes densidades de correntes (10, 20 e 40 mA/cm<sup>2</sup>) e adição de diferentes concentrações de gelatina (0, 50, 100 e 200 mg/L) no processo de clarificação de suco de maçã, onde os melhores resultados foram alcançados utilizando 20 mA/cm<sup>2</sup> e 200 mg/L de gelatina; STULP *et al.* (2005) avaliou a aplicação da eletroflotação utilizando eletrodos de titânio platinizado juntamente com tratamento biológico, alcançando 71% de redução da carga orgânica e 50% de redução da cor de efluente de indústria de balas e doces. CRESPILO, SANTANA E REZENDE (2003) avaliaram a aplicação da eletroflotação em efluente de indústria de processamento de coco, utilizando inversão de polaridade e eletrodos de alumínio, alcançando 96% em remoção de óleos e graxas e 99% de remoção de cor. DALLAGO *et al.* (2012) verificou a influência do pH e distância dos eletrodos na eficiência do tratamento, alcançando melhores resultados com pH igual a 7 e distância entre eletrodos igual a 0,5 cm e tensão igual a 5 V.

Indústria Petrolífera: IBRAHIM *et al.* (2013) avaliou a remoção de Carbono Orgânico Total (COT) no tratamento de efluente de refinaria de petróleo utilizando a eletroflotação em reator tubular e eletrodos de aço inox e RuO<sub>2</sub>/Ti, alcançando 83% de remoção. OLIVEIRA (2012) avaliou a redução de TOG (Teor de Óleos e Graxas) no tratamento de água produzida utilizando eletroflotação/Fenton e apenas eletroflotação, onde o processo combinado obteve redução de 93% TOG, utilizando tensão de 4 V e vazão de 100 L h<sup>-1</sup>. SANTOS, CRUZ e SOLETTI (2007) avaliaram a redução de TOG e DQO no tratamento eletrolítico de água produzida utilizando reator cilíndrico e fluxo contínuo de 800 e 1200 mL h<sup>-1</sup>, alcançando reduções superiores à 90% tanto para TOG quanto para DQO em ambas as vazões. RAMALHO (2008) avaliou a remoção de Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, utilizando eletrodos de ferro e, a oxidação de Fenol e BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) utilizando eletrodos de aço inox e eletrodos Ti/TiO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> em solução de NaCl, no tratamento de água produzida, obtendo 100% de remoção de BTEX em todas as vazões avaliadas, enquanto que a remoção de Zn<sup>2+</sup> teve variação

inversamente proporcional a vazão. LEITE (2009) avaliou a separação de óleos e graxas em emulsões óleo-água, e caracterizou as bolhas formadas ( $H_2$  e  $Cl_2$ ) quanto ao diâmetro, velocidade, área, volume e raio em relação à concentração de NaCl e densidade da corrente elétrica.

Biodiesel: BRITO *et al.* (2012) avaliou a aplicação da eletrofloculação no tratamento de água de purificação de biodiesel, o efluente permaneceu em tratamento por 24 horas, no entanto nas primeiras 5 horas já alcançou bons percentuais de remoção de turbidez e COT, constatou elevação de pH e geração de 4,5 % de lodo.

Indústria de Papel e Celulose: SOLOMAN *et al.* (2009) avaliou a aplicação de diferentes arranjos de reatores (batelada, batelada com recirculação, reator com reciclo e de fluxo contínuo) na remoção de DQO de efluente contendo lignina utilizando eletrodos de  $RuO_2/Ti$ , onde a maior eficiência de remoção (73 % de DQO) ocorreu em reator batelada com recirculação; FERREIRA (2006), comparou eletrodos de ferro e alumínio na remoção de sólidos suspensos, onde o eletrodo de alumínio alcançou melhores resultados, reduzindo em 96% a DQO, 98% os SS e 93% a Turbidez, no ensaio utilizando eletrodos de ferro houve redução de 83% da DQO, 97% de SS e 50% da Turbidez, foram calculados também os custos de operação para ambos os eletrodos, onde chegou-se aos valores de  $R\$/m^3$  7,01 e  $R\$/m^3$  2,84 para o alumínio e para o ferro, respectivamente.

Usinagem: FOGO (2008) utilizou eletrodos de alumínio para tratar efluente de fluido de corte, cujos contaminantes incluem óleos e graxas, HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos) BTEX e nitrosaminas, obtendo ao final do processo remoção total de HPAs e BTEX e redução de 90% de óleos e graxas.

Lavanderias: WANG *et al.* (2009) tratou efluente de lavanderia comparando eletrodos de alumínio e ferro, utilizou tensão de 5 V, pH neutro e ultrassom, os resultados mostram que a eletroflotação combinada ao ultrassom aumentou a eficiência de remoção de DQO em mais de 100% nos primeiros 10 minutos de tratamento quando comparada a eletroflotação sem ultrassom, essa melhora se deve à elevação das taxas de transferência de massa devido à melhora na hidrodinâmica do efluente e ao efeito de limpeza e reativação da superfície do eletrodo regenerando as áreas reativas.

Remoção de Metais Pesados: KHOSA *et al.* (2013) avaliou alguns parâmetros como pH e densidade de corrente no tratamento eletrolítico de efluente contendo metais pesados (Ni, Pb e Cd) utilizando eletrodos de alumínio e ferro, os resultados indicam melhor eficiência de

remoção em pH 7 tanto para o alumínio quanto para o ferro, a eficiência também aumenta com a elevação da densidade de corrente para ambos os materiais; MERZOUK *et al.* (2009) avaliou a remoção de Zn, Cd, Cu, Pb e Ni utilizando eletrodos de alumínio e avaliando parâmetros, cujos melhores resultados foram obtidos com densidade de corrente de 11,55 mA/cm<sup>2</sup>, 1cm de distância entre eletrodos, tempo de retenção de 10 minutos, pH inicial de 7,6 e condutividade elétrica de 2,1 mS/cm, alcançando remoção de 83% de DBO, 68% de DQO, 81% de turbidez, 86% de sólidos suspensos e 92% de cor .

Remoção de Flúor: ESSADKI *et al.* (2009) comparou a eficiência na remoção de flúor utilizando dois tipos de reatores: reator airlift de fluxo externo e reator de mistura contínua, ambos alcançaram performance semelhante na remoção de flúor, contudo, o autor ressalta que o reator airlift de fluxo externo não necessita de fonte de energia adicional para realizar a mistura, a qual é induzida no reator devido a geração de gases pelo processo de eletroflotação. Neste trabalho também observou-se que o pH inicial pode influenciar no mecanismo de remoção do flúor e que o pH na faixa de 4 a 5 proporciona melhor remoção, menor geração de lama e menor consumo do eletrodo.

Desinfecção de Efluentes Urbanos: COTILLAS *et al.* (2014) utilizou eletrodos de ferro e radiação ultravioleta (UV) para remoção de turbidez e de bactérias *Escherichia coli* em efluentes urbanos, a utilização de radiação UV juntamente com a eletroflotação proporcionou melhores resultados na remoção de *E. coli* devido a formação de hidroxila e radicais clorados, houve uma piora na remoção em densidade de corrente elevada (7,2 A/m<sup>2</sup>) devido à maior geração de sólidos, os quais impediam a ação da radiação UV. GHERNAOUT *et al.* (2008) comparou eletrodos de aço comum, aço inoxidável e alumínio na desinfecção de efluente contendo *E. coli*. Todos os eletrodos promoveram a desinfecção total do efluente em aproximadamente 30 minutos, sendo o eletrodo de alumínio ligeiramente mais eficiente, notou-se também que quanto maior o tempo e maior a densidade de corrente, menores eram as taxas de sobrevivência da *E. coli*.

Segundo pesquisas realizadas em bases de dados até julho de 2016, não foram encontrados estudos que avaliassem a aplicação da eletroflotação em efluentes da indústria florestal e especificamente de viveiros de eucalipto.

## **2.3.4 Fatores que afetam o processo**

Para que se obtenham melhores resultados no tratamento utilizando o processo de eletroflotação, alguns fatores devem ser consideradas durante o projeto, abaixo estão listadas os quais apresentam maior influência no processo e têm sido mais investigados em estudos sobre eletroflotação.

### **2.3.4.1 Reator**

Segundo HOLT (2004), o projeto do reator se fundamenta principalmente no tipo de operação (batelada ou contínuo) e no processo de separação associado. Outras considerações importantes são: a mistura dentro do reator, a medida da área dos eletrodos molhada pelo eletrólito em relação ao volume do líquido a ser tratado e por fim a densidade de corrente, importante no controle de coagulante gerado.

### **2.3.4.2 Condutividade**

A condutividade elétrica da solução afeta a eficiência da corrente portanto, quando se tem alta condutividade há menor consumo de energia (CANIZARES, 2008).

Para tratamento de efluentes com baixa condutividade aconselha-se a adição de eletrólitos para elevar a condutividade elétrica e otimizar o tratamento, evitando que se perca energia útil na dissipação do calor ocasionada pelo efeito Joule.

A distância entre os eletrodos, a geometria e a passivação dos mesmos também podem ser responsáveis pelo aumento da resistência à passagem de corrente.

### **2.3.4.3 Temperatura**

Segundo IBRAHIM (2013) o aumento da temperatura favorece o processo devido a maior movimentação dos íons, ocasionando maior probabilidade de colisão com o coagulante, além da condutividade aumentar com a elevação da temperatura. A temperatura portanto, pode influenciar a eficácia e o consumo energético do tratamento.

Em estudos realizados por CHEN (2004), há um incremento na eficiência de corrente até temperaturas próximas a 60 °C, temperaturas mais elevadas favorecem a rachadura dos flocos formados, os quais se depositam facilmente sobre os eletrodos.

#### **2.3.4.4 pH**

Em relação ao pH inicial da solução no tratamento, esta não tem tanta influencia quando a condutividade da solução é alta. No entanto há maior eficiência de corrente em alumínio quando o pH é ácido ou alcalino (CHEN, 2004), influenciando também a taxa de dissolução química do alumínio, que é mínima em pH neutro e se eleva a medida que o pH aumenta.

Por outro lado, segundo CANIZARES (2008), em pH neutro há maior remoção de impurezas e também a remoção da turbidez é melhor atingida, pois sabe-se que em pH ácido ou alcalino há maior solubilidade do hidróxido de alumínio.

Após o tratamento utilizando a eletroflotação há um incremento no valor do pH quando a solução está inicialmente abaixo de pH 7, em casos onde o efluente encontra-se acima de pH 9 há uma tendência em se estabilizar o pH, por isso a eletroflotação é conhecida como uma técnica neutralizadora de pH. (CRESPILHO, SANTANA E REZENDE, 2004).

#### **2.3.4.5 Material dos eletrodos**

Os eletrodos mais utilizados na eletroflotação são os de ferro e alumínio, mas outros podem ser utilizados tomando-se o cuidado com elementos que possam ser prejudiciais a saúde e ao meio ambiente.

Outros eletrodos frequentemente utilizados em tratamentos de efluentes são os inertes (os quais não sofrem desgaste na sua estrutura) neste caso ele não participa quimicamente da eletrólise, sua função é simplesmente a troca de elétrons com a solução (GARCIA, 2002).

Os eletrodos inertes comumente utilizados na eletroflotação são o grafite e a platina, há uma maior utilização de aço inox também, principalmente em indústrias alimentícias.

#### **2.3.4.6 Desgaste dos eletrodos**

O desgaste dos eletrodos é ocasionado devido ao processo oxidativo provocado pela eletrólise. Como mencionado anteriormente a eletrólise é regida pela lei de Faraday, a qual relaciona a corrente que atravessa o sistema com a massa consumida pela reação. Desta forma quanto maior a corrente aplicada maior será o consumo dos eletrodos e maior a quantidade de agente coagulante presente no meio. O desgaste dos eletrodos é, portanto, um parâmetro que deve ser controlado juntamente com a corrente elétrica a ser aplicada ao sistema, visando a otimização do processo com o menor consumo possível.

#### **2.3.4.7 Passivação dos eletrodos**

A passivação dos eletrodos ocorre principalmente devido à formação de um filme de óxido na superfície dos eletrodos, causando aumento da resistividade do sistema e queda na corrente elétrica ocasionando a perda da capacidade do reator gerar agente coagulante.

A solução proposta para a passivação seria a inversão da polaridade em intervalos de tempo. Segundo CRESPILO, SANTANA E REZENDE (2004) a inversão da polaridade aumenta a vida útil do eletrodo em até três vezes.

O acúmulo de bolhas de gases na superfície dos eletrodos deve ser evitado durante o tratamento, pois impede o contato da solução com a superfície.

#### **2.3.4.8 Densidade de Corrente**

A densidade de corrente consiste na razão entre a corrente aplicada e a área total dos ânodos. Altas densidades de corrente promovem maior oxidação do ânodo e, portanto maior liberação de agente coagulante e geração de gases, afetando principalmente o tempo de tratamento que diminui. Estudos realizados por CHEN (2004) mostram que há uma diminuição no tamanho das bolhas quando se eleva a densidade de corrente.

#### **2.3.4.9 Tensão aplicada**

Em estudos realizados por CASQUEIRA *et al.* citado por CANIZARES (2008), mostram que valores de tensão abaixo de 10V não promoviam a liberação densa e homogênea de bolhas, comprometendo desta forma a eficiência do tratamento.

A tensão aplicada também influencia a seletividade da reação, pois cada tipo de íon exige uma voltagem adequada para descarregar (GARCIA, 2002).

#### **2.3.4.10 Distância entre eletrodos**

A distância entre os eletrodos tem influência na transferência de massa, como citado anteriormente, as placas não devem estar tão próximas para não impedir o fluxo, distâncias maiores podem ser utilizadas quando o efluente tem alta condutividade, ao contrário disto haverá maior consumo de energia. A distância entre eletrodos altera a eficiência do tratamento e, portanto, é projetada com base na otimização do processo (FERREIRA, 2006).

#### **2.3.4.11 Eficiência de remoção**

A eficiência de remoção pode ser calculada através da determinação do percentual de redução de cada parâmetro. É dada pela equação (8) abaixo:

$$\eta = 100 \cdot \frac{C_i - C_f}{C_i} \quad 8)$$

Onde:

$\eta$  = Eficiência de remoção %

$C_i$  = Concentração inicial

$C_f$  = Concentração final

### 2.3.5 Limitações e vantagens da eletroflotação

A eletroflotação assim como outros tratamentos apresenta características que podem ser vantajosas ou não se analisadas em contexto específico.

#### Limitações

- Consumo de eletrodos;
- Consumo de energia elétrica;
- É necessário que o efluente tenha boa condutividade.

#### Vantagens

- Baixo custo de instalação e manutenção, o que o torna um tratamento viável para instalações domésticas e processos com baixo volume de efluente gerado;
- Os equipamentos utilizados são simples e fáceis de manejar;
- Facilidade de automação quando comparada a outros tratamentos;
- Admite variações de vazão (GARCIA, 2002);
- Baixa produção de lama quando comparada a outros tratamentos;
- Flocos formados com menos água, maiores e mais estáveis em meio ácido, facilitando a separação por filtração.
- Remove partículas coloidais.
- Não utiliza adição de produtos químicos, sendo considerado um tratamento *ecofriendly* (GHERNAOUT *et al.*, 2011);
- Fácil controle de geração e tamanho de bolhas;

-Formação de bolhas extremamente pequenas e uniformes requeridas principalmente na remoção de coloides e nanopartículas, onde a turbulência não é desejada (CARISSIMI, 2007).

Para ilustrar as diferenças existentes entre o processo de eletroflotação e outro processo de tratamento convencional são apresentadas na Figura 14 as comparações entre o processo eletrolítico e lodos ativados, cujos dados foram organizados por CERQUEIRA (2006).

Fatores	Eletrolítico	Lodos ativados (média)
Investimento (%)	70	100
Consumo de energia (kwh/m <sup>3</sup> )	0,15	0,4
Tempo de retenção no reator (horas)	0,5	7,5
Toxidez (sensibilidade)	Pouco sensível	Muito sensível
Sensibilidade a mudanças de pH	Baixa	Alta
Flexibilidade (localização / tipo de efluente)	Alta	Baixa
Salinidade elevada	Melhora a eficiência	Muito sensível
Temperatura	Suporta flutuação	Faixa estreita
Volume de lodo úmido (comparatvo)	33	100
Remoção de nitrogênio total (%)	65	40
Remoção de fosfatos (%)	99,7	45
Remoção de DBO (%)	80	90
Remoção de DQO (%)	80	90

Ref.: Tabela montada a partir de dados de Von Sperling (1996), Ramalho (1991), Wiendl (1985) e Leitão e Pires (1991).

Figura 14: Comparação entre processo eletrolítico e lodos ativados no tratamento de esgotos sanitários (CERQUEIRA, 2006)

Nota-se principalmente a capacidade do processo eletrolítico em suportar variações nas condições dos efluentes, visto que lodos ativados necessitam de temperaturas amenas, pH estável e apresentam restrições à alta salinidade e compostos tóxicos.

Outra grande vantagem da eletroflotação é o pequeno volume de lodo gerado em comparação aos tratamentos convencionais, impactando positivamente na redução de custos do processo ocasionados pela disposição de lodo em aterros.

Somente na remoção de DBO e DQO os lodos ativados superam a eficiência da eletroflotação, devido a este fato há alguns estudos que utilizam o lodo ativado após a eletroflotação, como complemento para redução de DBO e DQO (STULP, 2005).

Observa-se também que embora a energia elétrica seja fundamental no tratamento eletrolítico, seu consumo é baixo em relação ao tratamento com lodo ativado, o que gera algum

estranhamento, visto que os custos da eletroflotação consistem principalmente do consumo de energia e de eletrodos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Reator

Utilizou-se para o tratamento um reator tipo batelada, com capacidade para 40 L, sendo o equipamento constituído por eletrodos de alumínio, fonte com tensão de saída de 13,6 V, controlador de corrente e medidor de corrente (multímetro Minipa ET321) para acompanhamento da corrente elétrica. A confecção do reator (eletrodos, fonte de corrente e controlador de corrente) e implementação do processo foi efetuada pelo Prof. João Sinézio de Carvalho Campos, responsável pelo Grupo FisPol / DEMBio / FEQ / UNICAMP e orientador deste trabalho. Na Figura 15 abaixo o item (a) traz o diagrama de montagem do reator com seus acessórios: fonte de corrente (FC), controlador de corrente (CC), medidor de corrente (MC), cuba contendo os eletrodos (EI) de placas metálicas em alumínio. E o item (b) apresenta uma foto do reator mostrando a disposição dos equipamentos para o tratamento.

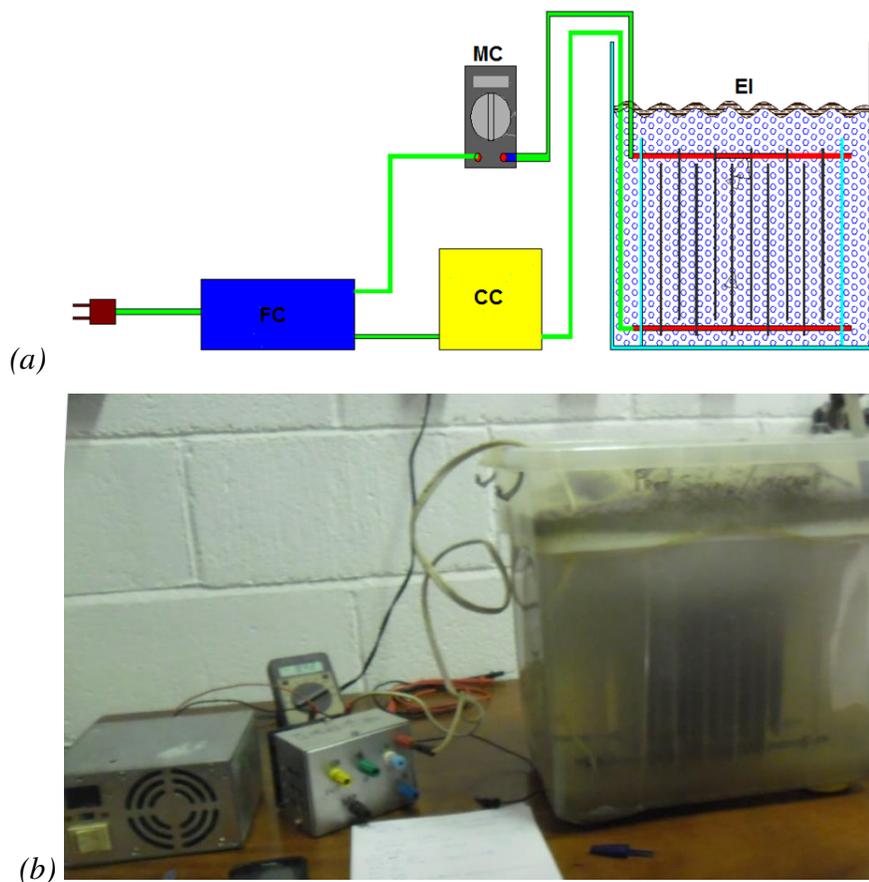


Figura 15: (a) Diagrama do reator (b) foto do reator com efluente ao final do tratamento

Os eletrodos de alumínio consistem em placas planas retangulares com área de 140 cm<sup>2</sup>, com 2 cm de espaçamento entre elas; o conjunto é composto de dez placas, cinco conectadas ao polo negativo e as outras cinco conectadas ao polo positivo da fonte de tensão, intercalando os polos.

### 3.2 Efluente

O efluente para o tratamento é oriundo de viveiro de mudas de eucalipto, localizado na cidade de Salto – SP.

O efluente deste viveiro consiste da água de irrigação e adubação que é drenada do pátio de mudas e através de canaletas segue até tanques de armazenamento Figura 16. Nestes mesmos tanques são armazenadas as águas das chuvas, que cai sobre os pátios de crescimento e rustificação. Esses armazenamentos são necessários devido à deficiência hídrica do local, que não conta com manancial superficial, e realiza a captação de água subterrânea para realização de seu processo produtivo.

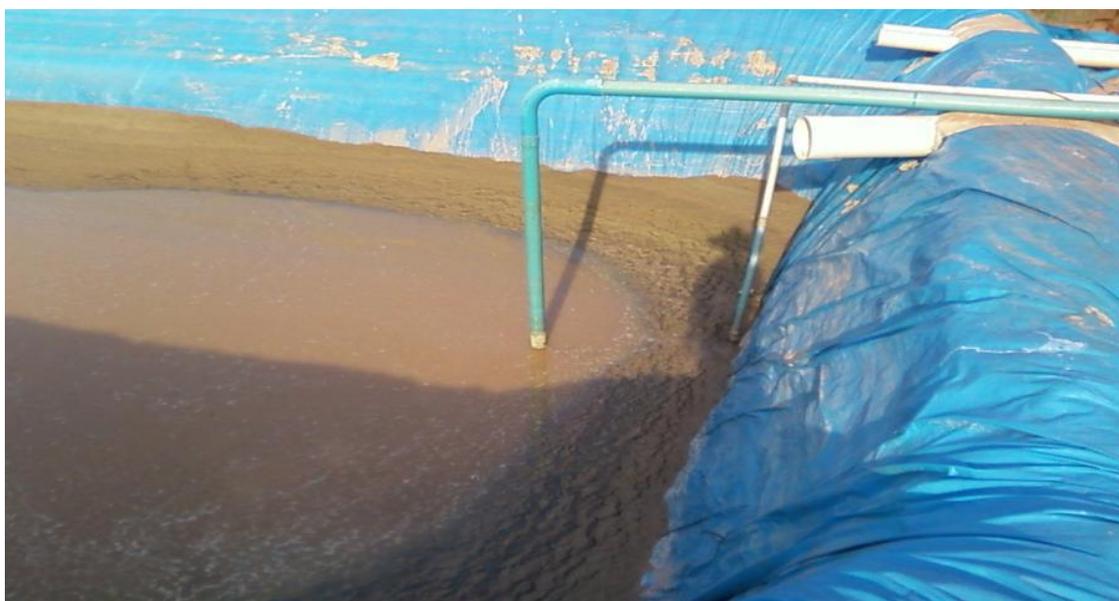


Figura 16: Tanque de armazenamento de efluente

Em épocas de escassez de chuvas, o efluente fica mais concentrado e com grande quantidade de sólidos suspensos, tornando-se muito turvo. E justamente nessas épocas seu reuso na irrigação se torna indispensável. Porém, ao ser reutilizado sem nenhum tratamento prévio, o

efluente deposita sobre as folhas das mudas de eucalipto partículas sólidas que, com a evaporação da água, formam um filme que impede a realização da fotossíntese, como pode ser observado na Figura 17.



Figura 17: Folha de eucalipto contendo manchas causadas pela irrigação com efluente não tratado

Abaixo a Figura 18 mostra mudas de eucalipto irrigadas com água de poço, as quais apresentam-se saudáveis, ou seja, sem acúmulo de sólidos na superfície.

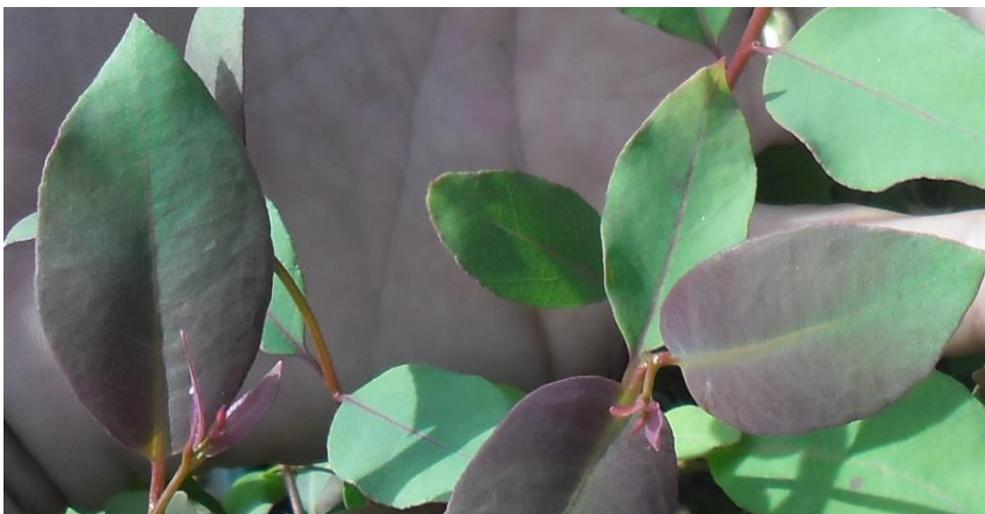


Figura 18: Folha de eucalipto irrigada com água de poço

### 3.2.1 Períodos das Coletas

Coletaram-se efluentes em três períodos do ano (meses de maio, setembro e novembro) no sentido de analisar a influência dos períodos de chuva. A Figura 19 apresenta os dados de precipitação ao longo dos meses de abril a dezembro de 2014. A precipitação segundo o

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da Estação A713 (a qual abrange as instalações da empresa cedente do efluente e corresponde a macroregião de Sorocaba), para o período em que as amostras foram coletadas está representada na imagem abaixo.

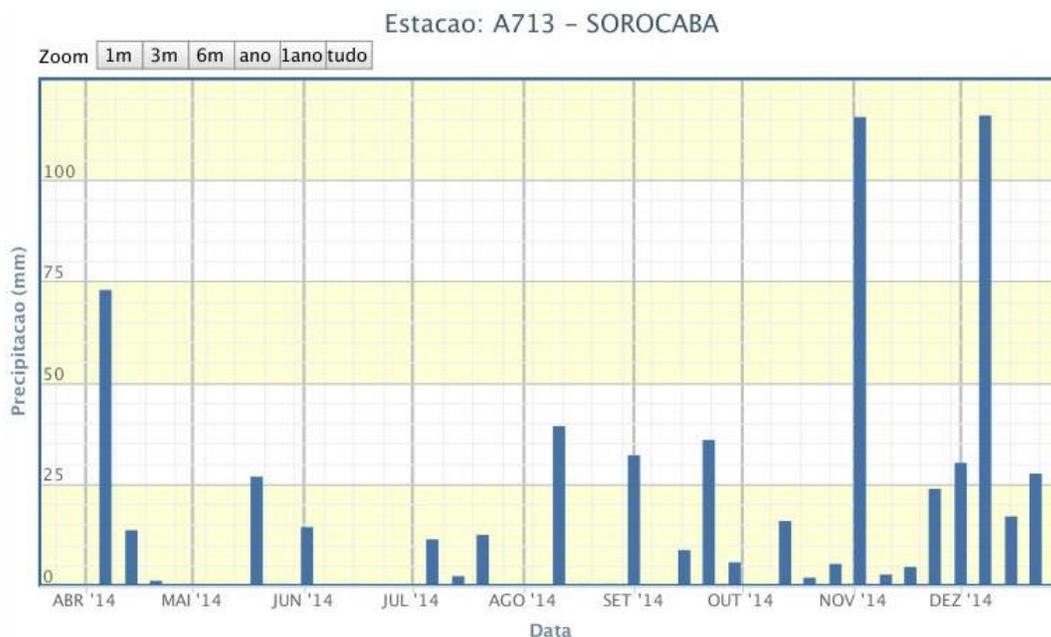


Figura 19: Índice pluviométrico da região de Sorocaba (INMET, 2014)

Observa-se na Figura 19 que os índices pluviométricos para os meses de maio, setembro e novembro são de aproximadamente 25 mm, 35 mm e 115 mm, respectivamente.

É bem conhecido que a composição do efluente sofre variação durante o ano em função da precipitação como também pela dosagem de fertilizantes nas águas de irrigação, drenagem e limpeza das galerias coletoras de efluente, conservação dos pátios por onde a água de irrigação escorre até chegar às galerias, entre outros. Tudo isso contribui para a turbidez e condutividade do efluente.

Desta forma, a caracterização do efluente precisou ser feita nos três períodos distintos, e seus dados são apresentados juntamente com os resultados de cada um dos três tratamentos realizados.

### 3.3 Procedimentos realizados durante tratamentos

Um teste foi realizado anteriormente, afim de testar todos os equipamentos e determinar o tempo aproximado de tratamento, o qual ficou ao redor de 55 minutos.

Após o teste inicial foram realizados três tratamentos com efluentes coletados em diferentes épocas do ano, o primeiro tratamento foi realizado dia 21/05/2014, o segundo em 14/09/2014 e o terceiro em 19/11/2014. O efluente foi coletado diretamente dos tanques de armazenamento da empresa e acondicionado em embalagens de polietileno com tampa, mantidas em temperatura ambiente até o dia seguinte.

Antes de colocar no reator homogeneizaram-se manualmente os efluentes e em seguida retirou-se uma amostra de 1,5 litros efluente bruto para análises, sendo o restante do efluente (cerca de 40 litros) despejado no reator. Permanecendo o efluente em tratamento por aproximadamente 55 min, ao final do qual observou-se (olho nú) aspecto transparente do efluente com acúmulo de bolhas e sólidos na superfície (sobrenadante) e flocos com aspectos gelatinosos no fundo do reator (precipitado), como mostra a Figura 20. Ao término do tratamento coletou-se 1,5 l do efluente tratado pela parte central do reator, e os sólidos flotados (sobrenadante) pela parte superior, para realização das análises.

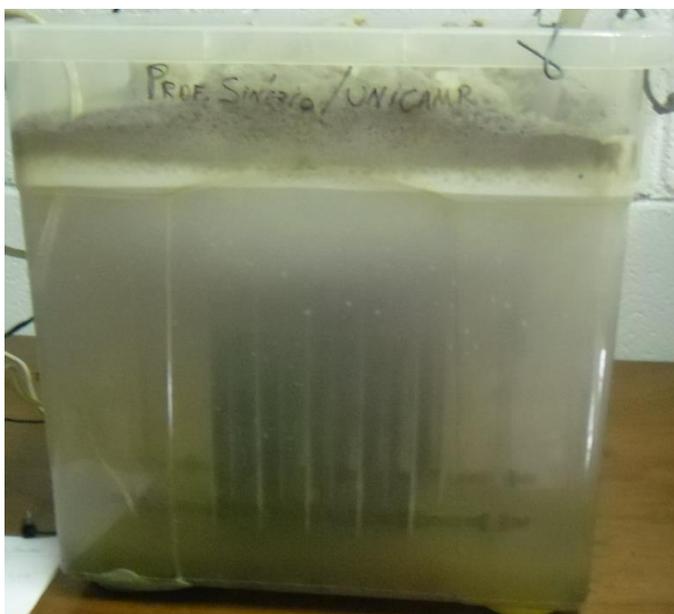


Figura 20: Efluente após 55 minutos de tratamento

### 3.4 Parâmetros analisados

De acordo com GIORDANO (2004) os parâmetros analisados na caracterização do efluente são utilizados para controlar a poluição e dimensionar tratamentos. Tais parâmetros estão relacionados às características físicas, químicas e sensoriais e são analisadas de acordo com o que tais medidas realmente significam.

Dentre os parâmetros científicos para avaliar um efluente, o presente trabalho selecionou analisar a turbidez, o pH, a condutividade elétrica, a DBO<sub>5</sub>, a DQO e os componentes inorgânicos (macronutrientes, micronutrientes e contaminantes). A seguir descrevem-se brevemente o significado de cada um destes parâmetros.

Turbidez: É a medida do espalhamento sofrido por um feixe de luz que incide na amostra, comparado ao espalhamento em uma solução padrão. Utiliza-se para esta análise o aparelho chamado turbidímetro e os valores obtidos são expressos em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). A turbidez em fluidos é predominantemente causada pela presença de sólidos suspensos e partículas coloidais como plâncton, organismos microscópicos, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida. A análise de turbidez foi realizada no turbidímetro da marca Hach modelo 2100N utilizando-se a método Nefelométrico.

pH: É a sigla do termo "Potencial Hidrogeniônico", sua medida é utilizada para classificar uma solução em ácida, neutra ou básica de acordo com a concentração de íons hidrogênio. A determinação do pH é feita eletrometricamente utilizando-se potenciômetro e eletrodos. Seu valor é expresso como cologarítmo decimal e corresponde à concentração de íons H<sup>+</sup> presentes na solução.

Condutividade elétrica: É a capacidade de uma solução conduzir corrente elétrica, pode ser medida através do aparelho chamado condutivímetro, tem seu valor expresso em Scm<sup>-1</sup>. Pode também ser calculada pela equação (5), abaixo:

$$k=R^{-1} \times A^{-1} = G \times c \quad (5)$$

Onde:

k = condutividade (Scm<sup>-1</sup>)

R = resistência (Ω)

G = R<sup>-1</sup> = condutância (S)

l = comprimento do trajeto da medida (cm)

A = área seccional transversal (cm<sup>2</sup>)

c = A<sup>-1</sup> = constante da célula (cm<sup>-1</sup>)

As medições de condutividade foram realizadas em condutivímetro da marca Micronal modelo 330.

Para fins comparativos, segue abaixo na Tabela 9 a condutividade elétrica de águas diversas.

Tabela 9: Condutividade elétrica de diferentes tipos de água (AgSolve, 2016)

<b>Tipo de água</b>	<b>Condutividade elétrica (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>
Água deionizada	0,5 - 3
Pura água da chuva	<15
Rios de água doce	0 - 800
Água de rios marginais	800 - 1.600
Água salobra	1.600 - 4.800
Água salina	>4.800
Água do mar	51.500
Águas industriais	100 - 10.000

DBO<sub>5</sub>: É a sigla do termo "Demanda Biológica de Oxigênio" que corresponde à medida do consumo de oxigênio devido à oxidação da matéria orgânica por meio de microorganismos biológicos. A DBO pode ser sucedida pelo subíndice 5 ou 20, os quais referem-se a quantidade de dias de incubação da amostra para ação dos microorganismos. Seus valores são expressos em  $\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$ .

DQO: É a sigla do termo "Demanda Química de Oxigênio" que corresponde à medida do consumo de oxigênio devido à oxidação da matéria orgânica e alguns compostos inorgânicos por meio de fortes oxidantes químicos. Seus valores são expressos em  $\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$ .

Macronutrientes: São os nutrientes necessários ao organismo vegetal diariamente e em grande quantidade, entre eles estão: fósforo, potássio, magnésio, cálcio e enxofre. Seus valores são medidos em  $\text{gKg}^{-1}$ . Suas concentrações foram analisadas utilizando espectroscopia de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Micronutrientes: São os nutrientes necessários ao organismo vegetal em pequena quantidade, entre eles estão: sódio, zinco, cobre, boro, manganês, ferro e cloro. Seus valores são medidos em  $\text{mgKg}^{-1}$  ou  $\mu\text{gKg}^{-1}$ . Suas concentrações foram analisadas utilizando espectroscopia de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Contaminantes: São principalmente compostos inorgânicos, tóxicos, contendo metais como: cádmio, chumbo, cromo, mercúrio e níquel. Seus valores são medidos em  $\text{mgKg}^{-1}$  ou  $\mu\text{gKg}^{-1}$ . Suas concentrações foram analisadas utilizando espectroscopia de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

As análises dos parâmetros:  $\text{DBO}_5$ , DQO, turbidez, pH e condutividade elétrica, utilizando como referência o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, normas 5210, 5220, 2130, 2310, 2510, respectivamente, foram realizadas pelo Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

As análises de contaminantes, macro e micronutrientes foram realizadas pelo Laboratório de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), de acordo com o método descrito na norma EPA3051 para a análise de contaminantes e a adição de ácido nítrico e perclórico no preparo das amostras de macro e micronutrientes e posterior leitura com o equipamento ICP-OES Varian MPX.

Cabe ressaltar que para critério de tempo final de tratamento utilizou-se a transparência observada a "olho nú", sendo que em todos os ensaios ocorreram pouco antes de 1 hora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Turbidez

A Figura 21 apresenta os valores da turbidez em Unidade de Turbidez Nefelométrica (NTU) para efluentes de viveiro de eucalipto tratados pelo processo de eletroflotação durante um tempo de 55 min; para os meses de maio, setembro e novembro. Observa-se que o valor inicial da turbidez é diferente para cada mês coletado e que em todos os casos ocorre redução da turbidez em comparação com a turbidez inicial, sendo de 98%, 99% e 66%, respectivamente para os meses de maio, setembro e novembro. Observa-se também que para o mês de novembro, apesar de a turbidez inicial ser menor que nos outros meses, também a redução foi menor, provavelmente devido a menor probabilidade de colisão e agrupamento das partículas, por estarem mais dispersas, neste caso, um tempo maior de tratamento ou um aumento na corrente elétrica podem ser uma alternativa na tentativa de melhorar a remoção de turbidez.

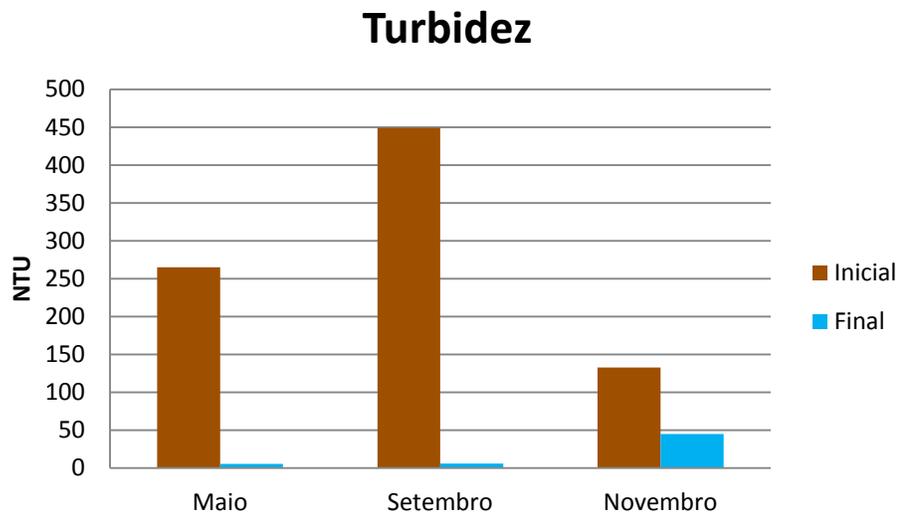


Figura 21: Turbidez inicial e final dos efluentes tratados por eletroflotação

## 4.2 pH

Os resultados de pH encontram-se na Figura 22, onde se tem os valores de pH para os efluentes antes e após o tratamento por eletroflotação para os respectivos meses de maio, setembro e novembro de 2014; sendo de 55 min o tempo de tratamento.

Observam-se em todos os casos um aumento no valor do pH, valor inicial de 7,5 (pH neutro) e ao final cerca de 10, 9,5 e 9,5 (pH básico) para os meses de maio, setembro e novembro, respectivamente; ou seja, aumento de 33% e 27%. Esta é uma característica do processo de eletroflotação, isto é, a elevação do pH do efluente, tanto que a eletroflotação é conhecida como uma técnica neutralizadora de pH quando o pH inicial é ácido.

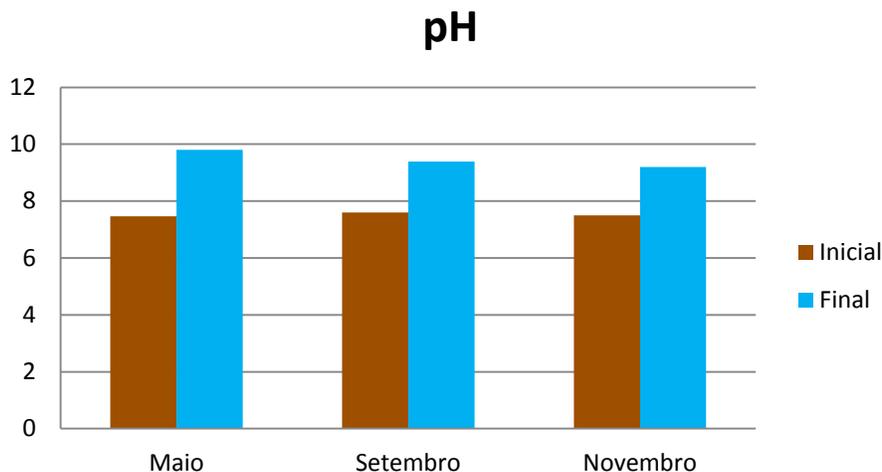


Figura 22: Valores de pH antes e após tratamento do efluente por eletroflotação

## 4.3 Condutividade elétrica

Os resultados para a condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) do efluente, medidos no início e final do tratamento por eletroflotação são apresentadas na Figura 23, para os efluentes de viveiro de mudas de eucalipto coletados nos meses de maio, setembro e novembro de 2014.

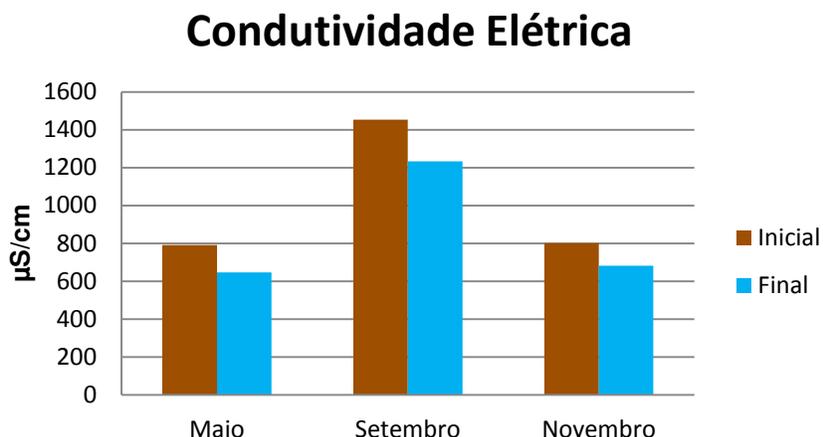


Figura 23: Condutividade elétrica inicial e final dos efluentes tratados por eletroflotação

Os resultados mostram que ocorre diminuição nos valores da condutividade elétrica, isto é, cerca de 19%, 16% e 15% respectivamente para os efluentes coletados nos meses de maio, setembro e novembro. Esta redução está associada à remoção de sólidos suspensos, por exemplo, zinco, cobre e manganês, componentes estes comuns nos processos de adubação das mudas.

#### 4.4 DBO<sub>5</sub>

Os resultados de DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/l) para os efluentes de viveiro de eucalipto, coletados nos meses de maio, setembro e novembro de 2014 e tratados pelo processo de eletroflotação, durante um tempo fixo de 55 min, estão apresentados na Figura 24. Desta figura observa-se que a DBO<sub>5</sub> inicial tem valores diferentes para cada mês de coleta, sendo respectivamente 17, 15 e 5 mgO<sub>2</sub>/l e que em todos os casos há nítida redução da DBO<sub>5</sub> de 69%, 80% e 40%, respectivamente para os meses de maio, setembro e novembro.

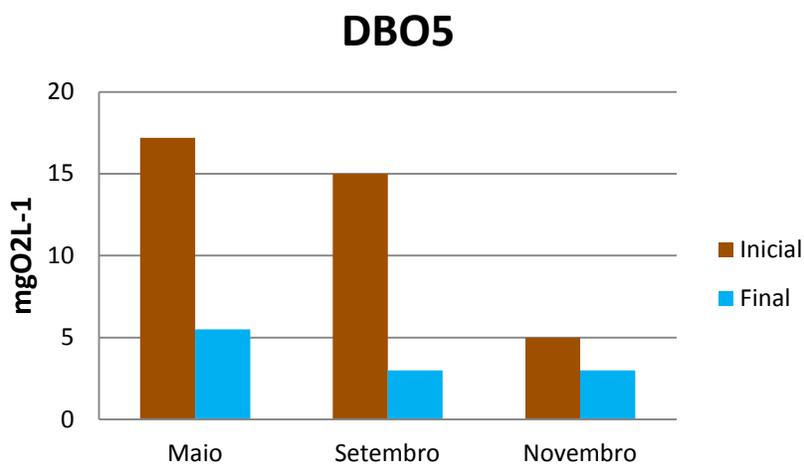


Figura 24: Valores iniciais e finais de DBO<sub>5</sub> para os efluentes tratados por eletroflotação

#### 4.5 DQO

Os resultados de DQO (mgO<sub>2</sub>/l) são apresentados na Figura 25. Observam-se que os valores de DQO iniciais são diferentes para cada mês de coleta (120, 110 e 60 mgO<sub>2</sub>/l para maio, setembro e novembro, respectivamente) e que ao final do tratamento sofrem redução de 89%, 95% e 42%, valores respectivos aos efluentes coletados nos meses de maio, setembro e novembro de 2014. Percebe-se aqui, como observou-se em relação aos valores de turbidez e DQO<sub>5</sub>, que também ocorre uma maior redução no parâmetro DBO para os efluentes de maio e setembro.

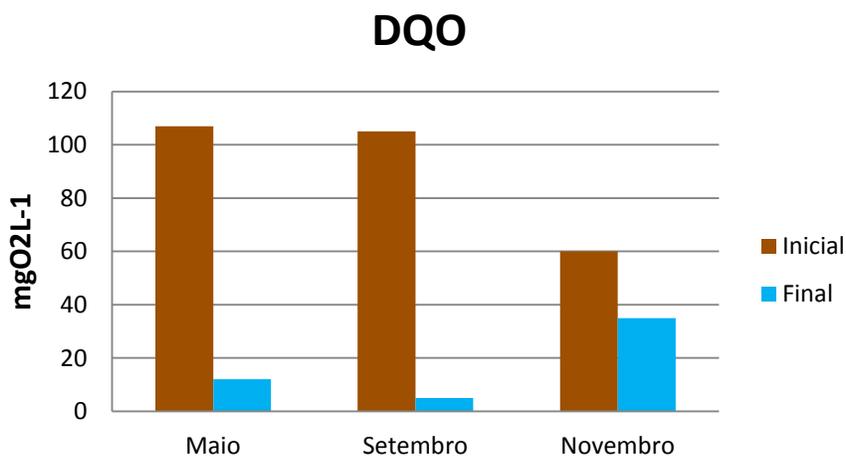


Figura 25: Valores iniciais e finais de DQO para os efluentes tratados por eletroflotação

## 4.6 Macronutrientes

Nas análises de macro e micronutrientes que seguem utilizou-se apenas o efluente do mês de setembro, principalmente por ter sido este o efluente com maior geração de resíduos sólidos, atendendo a quantidade necessária para proceder com as análises.

As quantidades em  $\text{gL}^{-1}$  de macronutrientes (fósforo, potássio, magnésio, cálcio e enxofre) encontrados no efluente antes e após o tratamento pelo processo de eletroflotação durante tempo de 55 min estão representados na Figura 26. Observa-se que após o tratamento ocorreu redução de macronutrientes, sendo a redução percentual de 73% para o fósforo, 100% para o potássio, 70% para o magnésio, 63% para o cálcio e 45% para o enxofre.

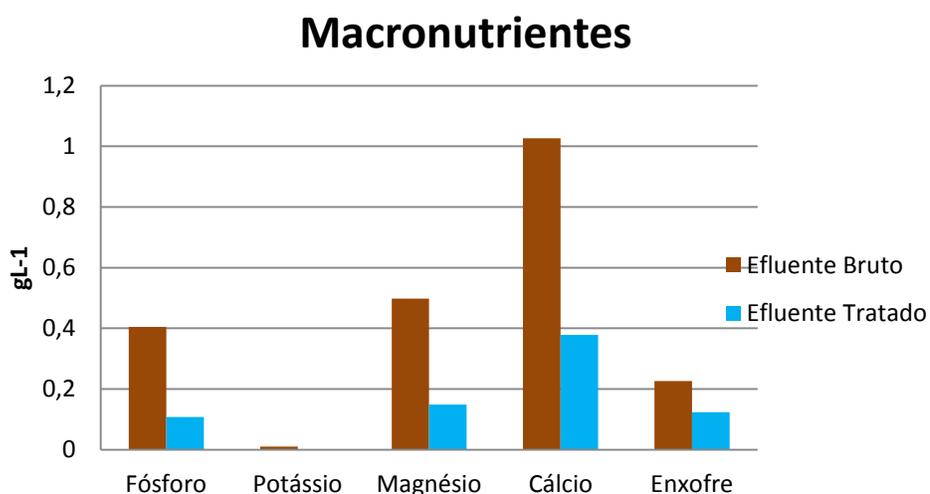


Figura 26: Macronutrientes presentes nos efluentes antes e após tratamento por eletroflotação

A redução de macronutrientes não é interessante se considerarmos que a reutilização do efluente será para irrigação das mudas de eucalipto, no entanto a remoção destas e outras substâncias fazem parte do processo de “limpeza” do efluente pela eletroflotação. Por outro lado, se observarmos a concentração dos macronutrientes dosados na solução de adubação (também chamada solução nutritiva) utilizada pela empresa, a qual está descrita na Tabela 10, veremos que a concentração de todos os macronutrientes analisados, exceto o potássio, estão presentes no efluente tratado em quantidade superior à necessária. É importante notar que a concentração de potássio no efluente bruto também é baixa e, portanto sua ausência no efluente tratado é reflexo desta baixa concentração e não uma característica do tratamento eletrolítico.

Tabela 10: Faixa de concentração dos macronutrientes na solução nutritiva (Brotale, 2014)

Macronutrientes	Doses (g L <sup>-1</sup> )
Nitrogênio (N)	0,1 - 0,2
Fósforo (P)	0,015 - 0,030
Potássio (K)	0,1 - 0,2
Cálcio (Ca)	0,1 - 0,2
Magnésio (Mg)	0,025 - 0,05
Enxofre (S)	0,035 - 0,065

Desta forma, poderia-se suspender uma adubação à cada utilização do efluente tratado na irrigação, gerando economia com a compra de fertilizantes, sendo necessário apenas a adição do macronutriente faltante.

#### 4.7 Micronutrientes

Os resultados da análise de micronutrientes estão representados na Figura 27, onde se tem os valores de micronutrientes (sódio, zinco, cobre, boro e manganês) encontrados no efluente de viveiro de mudas de eucalipto, para o efluente antes (bruto) e após o tratamento por eletroflotação. Também se observa grande redução nos valores destes micronutrientes exceto para sódio, que sofreu redução de 15% somente. Para o zinco houve redução de 56% em concentração, 44% para o cobre, 56% para o alumínio, 41% para o boro e 68% para o manganês e para o ferro.

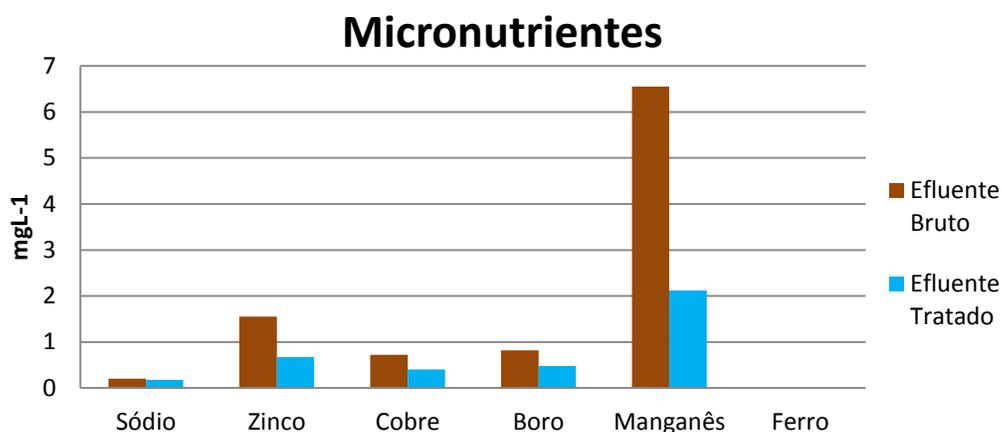


Figura 27: Micronutrientes presentes no efluente antes e após tratamento por eletroflotação

A faixa de concentração de micronutrientes presentes na solução nutritiva encontra-se listada na Tabela 11. Assim como os Macronutrientes, alguns micronutrientes, também estão em concentrações superiores às requeridas na solução nutritiva. Há no efluente tratado seis vezes

mais cobre e zinco e duas vezes mais Manganês do que na solução nutritiva, apenas o boro encontra-se dentro da faixa de concentração estabelecida.

Tabela 11: Faixa de concentração dos micronutrientes na solução nutritiva (Brotale, 2014)

Micronutrientes	Doses ( $\text{mgL}^{-1}$ )
B	0,3 - 0,6
Cu	0,03 - 0,06
Fe	2,5 - 5,0
Mn	0,3 - 0,8
Mo	0,01 - 0,02
Zn	0,05 - 0,1
Si	40 - 80

#### 4.8 Contaminantes

A quantidade de contaminantes metálicos das amostras do mês de setembro antes e após o tratamento por eletroflotação encontra-se na Figura 28, onde pode-se observar a redução próxima a 100% para chumbo e cromo e de 28% para o cádmio. Esses dados confirmam a eficiência da eletroflotação na remoção de metais, como já citado em estudos anteriores.

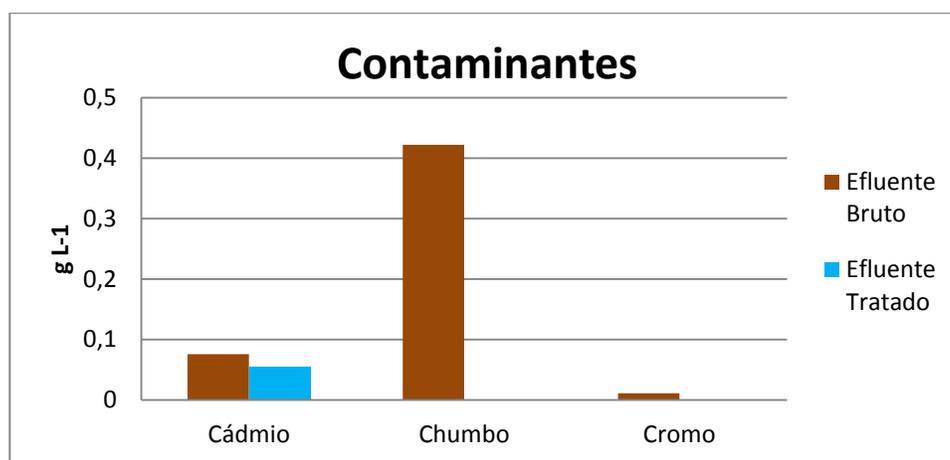


Figura 28: Contaminantes presentes no efluente antes e após tratamento por eletroflotação

No entanto, pode-se notar a menor eficiência na remoção do cádmio, é possível que este tenha ficado numa forma solúvel e por isso tenha permanecido no efluente. Uma alternativa para elevar a remoção do cádmio seria a reação com enxofre, formando sulfeto de cádmio, pois este é menos solúvel e menos propenso a ação de agentes complexantes, como mostra a Figura 29.

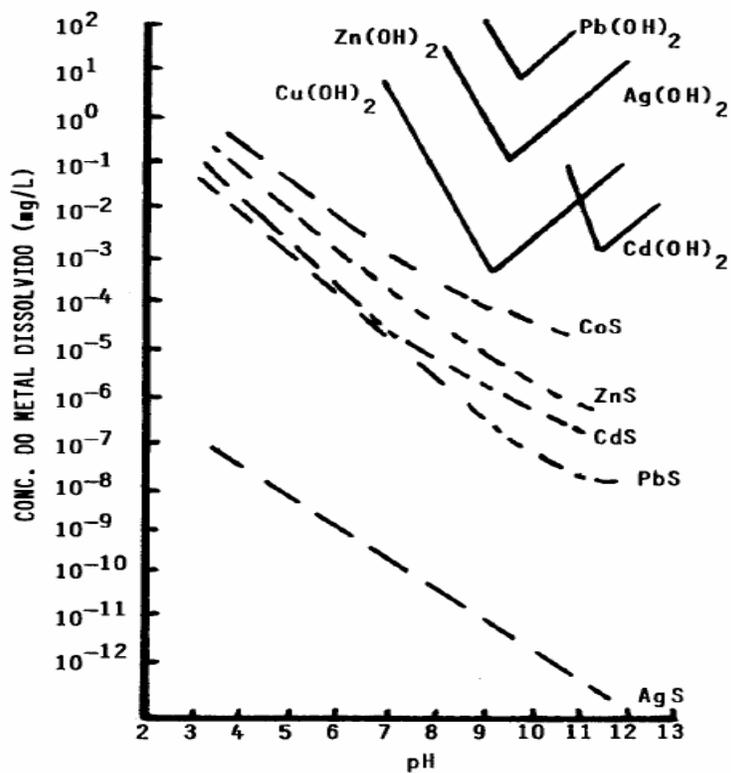


Figura 29: Solubilidade de hidróxidos e sulfetos metálicos na água em função do pH (EPA, 1978)

#### 4.9. Sobrenadante

As análises de macro e micronutrientes realizadas com o sobrenadante do mês de setembro, Figuras 30 e 31, revelaram a presença de quantidade elevadas de nutrientes, gerando a possibilidade de reaproveitamento como componente do substrato em que são plantadas as mudas de eucalipto. Porém é necessário ainda testar o resíduo quanto à solubilidade dos componentes, para que estes possam ser absorvidos pela planta.

### Macronutrientes - Resíduo sólido flotado

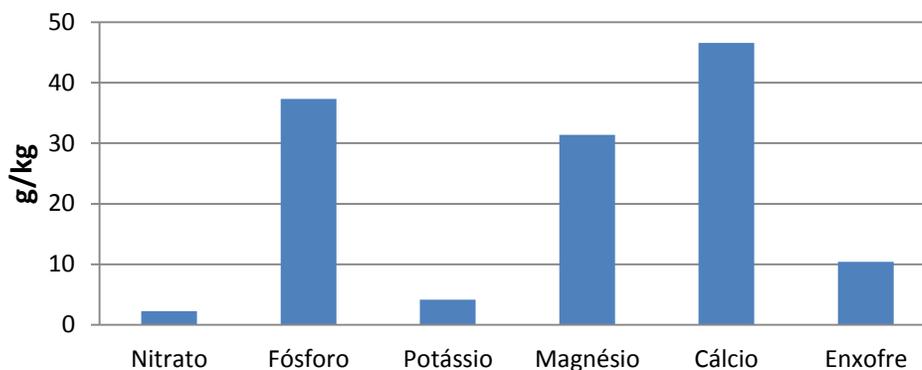


Figura 30: Macronutrientes presentes no sobrenadante tratado no mês de setembro

Observa-se na análise de micronutrientes do sobrenadante a presença de molibdênio, o qual não havia sido detectado nas amostras líquidas devido à baixa concentração.

As concentrações de ferro e alumínio no sobrenadante são bastante elevadas, a amostra continha cerca de  $9 \text{ gKg}^{-1}$  de ferro e  $61 \text{ gKg}^{-1}$  de alumínio, este último provavelmente oriundo dos eletrodos (placas de alumínio) utilizados na eletroflotação. Segundo MIGUEL (2010) o alumínio é o elemento mais abundante no solo, pois a maior parte dos minerais presentes em rochas sedimentares são aluminossilicatos, no entanto a solubilidade deste elemento no solo é fortemente influenciada pelo pH, e ocorre com maior incidência em pH abaixo de 5,5.

### Micronutrientes - Resíduo Sólido Flotado

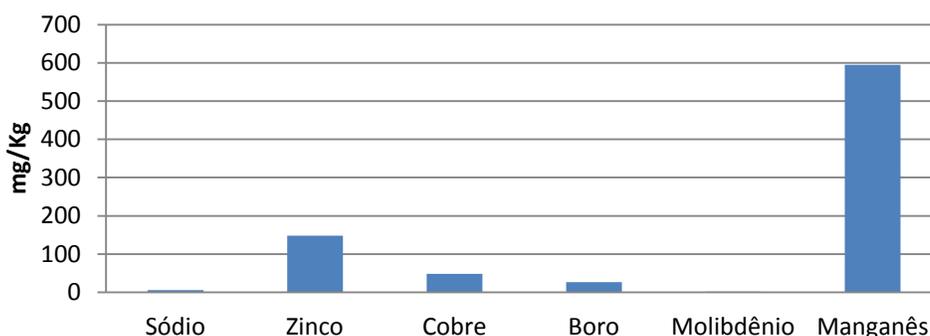


Figura 31: Micronutrientes presentes no sobrenadante tratado no mês de setembro

O alumínio não faz parte dos micronutrientes necessários para espécies vegetais em geral, nem para o eucalipto, porém alguns autores (SALVADOR, 2000 e FOY 1996) relataram que em baixas concentrações ( $0,25 - 0,30 \text{ mgL}^{-1}$ ) o alumínio estimulou o crescimento de culturas como goiaba e milho. Algumas hipóteses foram levantadas pelos autores para explicar a ação benéfica do alumínio, como: aumento na solubilidade e disponibilidade de Fe resultante da acidez provocada pelo alumínio e bloqueio de cargas negativas da parede celular, promovendo maior absorção de fósforo.

Em relação aos contaminantes, o sobrenadante apresentou pequenas quantidades, e de acordo com a resolução nº 375 do CONAMA (a qual define os critérios para uso agrícola de lodos gerados em tratamentos de efluentes), como os valores estão bem abaixo do máximo permitido, como mostram a Figura 32 e a Tabela 12, há possibilidade de serem avaliados para usos como fertilizantes.

### Contaminantes - Resíduo Sólido Flotado

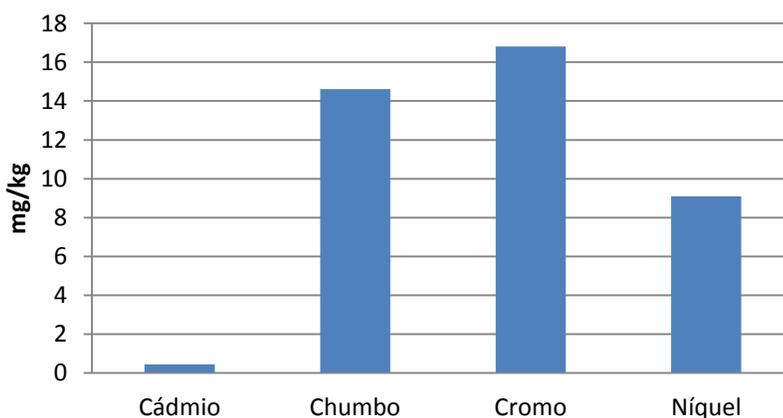


Figura 32: Contaminantes presentes no sobrenadante tratado no mês de setembro

Tabela 12: Valores máximos permitidos para contaminantes e sua porcentagem no resíduo sólido tratado (RES. 375 CONAMA, 2006)

Elemento	Máximo (mg/kg)	% no efluente
Cádmio	39	1,1
Chumbo	300	4,9
Cromo	1000	1,7
Níquel	420	2,2

#### 4.10 Resumo dos resultados

A Tabela 13, a seguir, tem por objetivo reunir os principais resultados obtidos no tratamento de efluentes de águas de irrigação e pluviais utilizadas em viveiros de mudas de eucalipto, da empresa Brotale LTDA, localizada na cidade de Salto – SP. Nesta tabela encontram-se os valores das propriedades físico-químicas para tratamento de efluente utilizando-se da técnica de eletroflotação. Efluente de viveiro de mudas de eucalipto e tempo de tratamento fixado em 55 minutos, efluentes coletados nos meses de maio, setembro e novembro de 2014.

Analisando-se tais resultados observa-se claramente que o processo de eletroflotação apresenta grande potencial de uso para aplicação em tratamento de efluentes da indústria voltada a produção de mudas de eucalipto. Tendo como característica sua eficiência na remoção de sólidos suspensos totais, não utilização de produtos químicos e baixo tempo de tratamento em comparação aos métodos tradicionais; principalmente ao levar em consideração os parâmetros essenciais para avaliação do reuso do efluente, como por exemplo, a turbidez, DBO<sub>5</sub> e DQO.

Tabela 13: Valores das propriedades físico-químicas para o processo de eletroflotação aplicado a efluente de viveiro de mudas de eucalipto

Propriedade	Inicial			Final			Remoção (%)			
	Físico-química	Maio	Setembro	Novembro	Maio	Setembro	Novembro	Maio	Setembro	Novembro
Turbidez (NTU)		250	450	120	5,5	6,18	44,9	98	99	66
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /l)		17	15	5	5,5	3	3	69	80	40
DQO (mgO <sub>2</sub> /l)		120	110	60	12	5	35	89	95	42
pH		7,5	7,5	7,5	10	9,5	9,5			
Condutividade (μS/cm)		800	1450	800	600	1200	700	25	17	12,5

## 4.11 Análise de custo

Dentre os fatores que antecipam a aprovação de um projeto, a análise técnico-econômica constitui uma das ferramentas importantes na avaliação de viabilidade de implantação e capacidade de atuação.

Além da avaliação das condições atuais para implantação do projeto, o levantamento de informações sobre condições à médio e longo prazo também são requeridas. Segundo LEONE (2000), há vários tipos de custos, dentre eles: Custos Diretos (ex.: matéria-prima, mão de obra), Custos Indiretos (ex.: aluguel do imóvel), Custos Fixos (ex.: salário dos empregados, depreciação dos equipamentos) e Custos Variáveis (ex.: quantidade de matéria-prima).

Na análise de custos realizada sobre a aplicação da eletroflotação em efluente de viveiro florestal estão apresentados os custos referentes ao consumo de energia elétrica e ao consumo de eletrodo, visto que estes dois fatores são os mais dispendiosos, representando cerca de 80% do custo total da operação (KOBYA, *et al.*, 2006).

### 4.11.1 Consumo de energia

O consumo de energia é calculado teoricamente utilizando-se a equação (9), a qual relaciona o consumo de energia com a tensão, corrente elétrica, tempo e volume (FERREIRA, 2006).

$$C_{\text{energia}} = \frac{U \times i \times t}{V} \quad (9)$$

Onde:

$C_{\text{energia}}$  = consumo de energia, W.h/ m<sup>3</sup>.

U= tensão elétrica, V.

i = corrente, A.

t = tempo de aplicação da corrente, h.

V= volume de efluente tratado, m<sup>3</sup>.

Para os tratamentos realizados neste estudo foram utilizadas tensão, volume e tempo de tratamento fixos, sendo que a houve, em todos os ensaios, certa variação na corrente elétrica, pois à medida que o efluente se torna limpo há menor número de partículas capazes de transmitir corrente elétrica, sendo utilizado portanto o valor médio da corrente elétrica. Os valores para cada variável estão indicados a seguir.

#### Valores para cálculo:

$U = 13,5 \text{ V}$ .

$i = 8 \text{ A}$ .

$t = 1 \text{ h}$ .

$V = 0,04 \text{ m}^3$ .

$$C \text{ energia} = \frac{13,5 \times 8 \times 1}{0,040} = 2700 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3} = 2,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

Desta forma, foram para tratar  $1\text{m}^3$  do efluente serão necessários aproximadamente 2,7 kWh.

#### 4.11.2 Consumo do eletrodo

O consumo do eletrodo é calculado também teoricamente, através da equação (10):

$$M \text{ eletrodo} = \frac{i \times t \times M}{F \times z} \quad (10)$$

Onde:

$M_{\text{eletrodo}}$  = massa dos eletrodos consumidos durante a eletroflotação, g.

$i$  = corrente, A.

$t$  = tempo de aplicação da corrente, s.

$M$  = massa molar do elemento predominante do eletrodo, g/mol.

$F$  = constante de Faraday, 96.500 C/mol.

$z$  = número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do ânodo. Para o alumínio,  $z = 3$ .

**Valores para cálculo:**

$$i = 8 \text{ A.}$$

$$t = 3600 \text{ s.}$$

$$M = 27 \text{ g/mol.}$$

$$F = 96.500 \text{ C/mol.}$$

$$z = 3.$$

$$M \text{ eletrodo} = \frac{8 \times 3600 \times 27}{96500 \times 3} = 2,686 \text{ g}$$

Para o tratamento de 40 L de efluente foram consumidos aproximadamente 2,69 g de Alumínio. Abaixo temos o cálculo da quantidade de alumínio requerida considerando um volume igual à 1m<sup>3</sup> de efluente.

$$\frac{2,686}{0,040} = 67,15 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \text{ Al}$$

Ou seja, serão consumidos aproximadamente 67,2 g de alumínio por m<sup>3</sup> de efluente tratado.

**4.11.3 Custo da operação**

Como citado anteriormente o custo da operação considera apenas o consumo de energia elétrica e o consumo dos eletrodos (equação 11), devido à relevância para efeitos de custos destes dois fatores em relação aos demais. Embora haja outros itens como: manutenção, operação, tratamento e disposição de lodo que possam agregar custo ao tratamento.

(11)

$$CO = a \times C \text{ energia} + b \times C \text{ eletrodo}$$

Onde:

$CO$  = custo de operação, R\$/m<sup>3</sup> efluente.

$a$  = custo de energia, R\$/kWh.

$C_{\text{energia}}$  = consumo de energia, kW.h/m<sup>3</sup> efluente.

$b$  = custo mássico da placa, R\$/kg eletrodo.

$C_{\text{eletrodo}}$  = consumo do eletrodo, kg/m<sup>3</sup>efluente.

### Valores para cálculo:

$a = 0,4038$  R\$/kWh

$C_{\text{energia}} = 2,7$  kWh/m<sup>3</sup>

$b = 37,03$  R\$/kg eletrodo

$C_{\text{eletrodo}} = 0,06715$  kg/m<sup>3</sup>

$$CO = 0,04038 \times 2,7 + 37,03 \times 0,06715$$

$$CO = 1,09026 + 0,2486564 = 1,34 \frac{R\$}{m^3}$$

Os cálculos revelam o custo de aproximadamente R\$ 1,34 por m<sup>3</sup> de efluente, valor este que pode ser minimizado após otimização do processo, principalmente em relação ao tempo de tratamento.

É importante relatar que em alguns momentos o viveiro estudado necessitou comprar água para substituir o uso do efluente na irrigação, com o custo de R\$500,00 por caminhão pipa (20m<sup>3</sup> de água), ou seja, o custo do m<sup>3</sup> comprado (R\$ 25,00/m<sup>3</sup>) é cerca de 18 vezes maior que o custo do tratamento do efluente para reuso.

Deve-se considerar também que a instalação e operação de um sistema de tratamento eletrolítico são muito mais flexíveis em relação aos tratamentos convencionais, como demonstrado na Figura 12 e no tópico 2.3.5.

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, sobre a avaliação do processo de eletroflotação aplicado ao tratamento de efluentes de viveiro de mudas de eucalipto, com efluentes coletados nos meses de maio, setembro e novembro de 2014, e tempo de tratamento total de 55 minutos, pode-se concluir que:

- O processo de eletroflotação reduz a turbidez (em até 99%), a DBO<sub>5</sub> (em até 80%) e a DQO (em até 95%);
- Elevação do pH, valor inicial 7,5 a próximo de 10 no final;
- Ocorre redução da condutividade do efluente;
- O tempo de tratamento de 55 min. é pequeno em comparação aos tratamentos tradicionais (Processos Oxidativos Avançados (POA's), lodo ativado, sedimentação).
- Após o tratamento com eletroflotação o efluente ainda contém quantidade elevadas de macro e micronutrientes.
- Há presença de grandes quantidades de macro e micronutrientes no resíduo sobrenadante, possibilitando o reaproveitamento deste como parte do substrato.

Com base em tais resultados observa-se o grande potencial de utilização da eletroflotação no tratamento de efluente para reuso da água em irrigação de mudas de eucalipto produzidas em viveiro, principalmente considerando o relativo baixo tempo de tratamento do efluente (abaixo de 1h) e da não necessidade de se adicionar outros produtos químicos. Contudo, estudos em escala industrial se fazem necessários.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar o tratamento de efluente de viveiro de eucalipto utilizando eletrodos de ferro.
- Avaliar a solubilidade de macro e micronutrientes presentes no sobrenadante, para que estes possam ser reutilizados no processo.
- Realizar a análise-técnico econômica do tratamento e calcular a redução de custos devido ao reaproveitamento de fertilizantes.
- Realizar o tratamento em reator contínuo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012. Brasília, 2013.

AGSOLVE – Monitoramento Ambiental. Disponível em:

<https://www.agsolve.com.br/noticias/como-e-porque-medir-a-condutividade-eletrica-ce-com-sondas-multiparametros> Acesso em: Março, 2016.

AGUIAR, C. A. L. Relatório 2015 Indústria Brasileira da Árvore (IBÁ). Poyry Consultoria em Gestão e negócios LTDA.2015.

ANA – Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Informe 2010. Brasília, 2010.

ANA - Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Informe 2014 – Encarte especial sobre a crise hídrica. Brasília, 2015.

ARAYA-FARIAS, M.; MONDOR, M.; LAMARCHE, F.; TAJCHAKAVIT, S.; MAKHLOUF, J. Clarification of apple juice by electroflotation. Innovative food and science and emerging technologies, Quebec, v. 9, p. 320-327, 2007.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. Dados do Setor: Março de 2014. Disponível em: [www.bracelpa.org.br](http://www.bracelpa.org.br) Acesso em: Outubro, 2015.

BRASIL. Lei n. 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm)> Acesso em: 10/10/2015.

BRITO, J. F.; FERREIRA, L. O.; SILVA, J. P.; RAMALHO, T. C. Tratamento da água de purificação do biodiesel utilizando eletrofloculação. Química Nova, v35, n4, p.728- 732, 2012.

CAMBOIM, R. A. Técnica de eletroflotação aplicada na remoção de cores de efluentes têxteis. Dissertação - UNICAMP. Campinas, 2010.

CAÑIZARES, P.; MARTINEZ, F.; JIMENES, C.; SAEZ, C.; RODRIGO, M. A. Coagulation and electrocoagulation of oil in water emulsions. *Journal of Hazardous Materials*, 2007.

CARISSIMI, E.; RUBIO, J.; ROSA, J. J. Flotation in water and wastewater treatment and reuse: recent trends in Brazil. *Environment and Pollution*, v30, n2, p. 193-207, 2007.

CASQUEIRA, R. G. Remoção de zinco e cádmio por eletroflotação e eletrocoagulação. Tese de Doutorado – PUC – RJ. Rio de Janeiro, 2004.

CERQUEIRA, A. A. Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis. Dissertação - UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

CHEN, G. Electrochemical Technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, v38, p. 11-41, 2004.

COLODETTI, T. V.; RODRIGUES, W. N.; OLIVEIRA, F. L.; LIMA, D. M.; TOMAZ, M. A. Efeito do alumínio na germinação e na morfologia radicular de Cultivares de pepino. *Enciclopédia Biosfera*, v8, p.7-67, 2012.

COTILLAS, S.; LLANOS, J.; MIRANDA, O. G. et al.. Coupling UV irradiation and electrocoagulation for reclamation of urban wastewater. *Electrochimica Acta*, v140, p. 396-403, 2014.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Química Nova*, v27, n3, p.387-392, 2004.

DALLAGO, R. M.; DI LUCCIO, M.; KÜHN, M. E.; KREBS, J.; DO NASCIMENTO, M. S.; BENAZZI, T. L.; VENQUIARUTO, L. D.; MORES, R. Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluente de laticínio. *Perspectiva Erechim*, v36, n135, p. 101-111, 2012.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: [www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)  
Acesso em: Outubro, 2015.

ESFANDYARI, Y. MAHDAVI, Y. SEYEDSALEHI, M. et al.. Degradation and biodegradability improvement of the olive mill wastewater by peroxi-electrocoagulation / electrooxidation-electroflotation process whit bipolar aluminium electrodes. *Environ Sci Pollut Res*, Berlim, 2014.

ESSADKI, A. H.; GOURICH, B.; AZZI, M. et al.. Kinect study of defluoridation of drinking water by electrocoagulation /electroflotation in a stirred tank reactor and in na external-loop airlift reactor. *Chemical Engineering Journal*, v164, n1, p. 106-114, 2010.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. The state of food insecurity in the world. Itália, 2004.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. “Technology for Treatment of Effluents of Metal Finishing Industries: Sulfide Precipitation”. *Technology Transfer Series*, Washington, 1978.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Global forest resources: How are the world’s forests changing?. Itália, 2015.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Relatórios ano base 2010. Disponível em: [www.fao.org](http://www.fao.org) Acesso em: Outubro, 2015.

FERREIRA, L. H. Remoção de sólidos em suspensão de efluente de indústria de papel por eletroflotação. *Dissertação - UNICAMP*. Campinas, 2006.

FERREIRA, R. P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. Toxidez de alumínio em culturas anuais. *Documentos 63, EMBRAPA*, 2006.

- FLOSS, M. I.; CALLEGARO, T. Utilização de eletrodos de sacrifício de ferro na eletrofloculação do efluente de uma indústria têxtil: avaliação da eficiência do tratamento. Trabalho de conclusão de curso – UTFPR. Medianeira, 2011.
- FOGO, F. C. Avaliação e critérios de eficiência nos processos de tratamento de fluido de corte por eletroflotação. Dissertação - USP. São Carlos, 2008.
- FOY, C. D.; FLEMING, A. L.; ARMIGER, W. H. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. *Agronomy Journal*, v. 61, p. 505-511, 1996.
- GARCIA, T. V. Remoção de algas através da eletroflotação – tratamento eletrolítico seguido de filtração direta no tratamento de água de abastecimento. Dissertação – UFSC. Florianópolis, 2002.
- GHERNAOUT, D.; BADIS, A.; KELLIL, A. et al.. Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface water. *Desalination*, v219 p. 118 – 125, 2008.
- GHERNAOUT, D.; IRKI, S.; BOUCHERIT, A. Removal of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$ , and humic acid and phenol by electrocoagulation using iron electrodes. *Desalination and water treatment*, p.1-15, 2011.
- GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. Departamento de engenharia sanitária e do meio ambiente – UERJ, 2004.
- HERMITE, E. Apparatus for bleaching by electrolysis. US Pat. 378681A, 25 out. 1887. 2p.
- HOLT, P. K.; BARTON, G. W.; MITCHELL, C. A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, v59, p.355-367, 2005.
- IBRAHIM, D. S.; DEVI, P. S.; VEERABABHU, C e BALASUBRAMANIAN, N. Treatment of petroleum effluent using a tubular electrochemical reactor. *Petroleum Science and technology*, v32, n16, p. 1932-1939, 2013.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> . Acesso em: 10/10/2015.

KALYANI, K. S. P.; BALASUBRAMANIAN, N., SRINIVASAKANNAN, C. Decolorization and COD reduction of paper industrial effluente using electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*. v151, p. 97-104, 2009.

KHOSA, M. K.; JAMAL, M. A.; HUSSAIN, A. et al.. Efficiency of aluminium and iron electrodes for the removal of heavy metals [Ni(II), Pb(II), Cd(II)] by electrocoagulation method. *Journal of the Korean Chemical Society*, v57, n3, p. 316-321, 2013.

KOBYA, M.; HIZ, H.; SENTURK, E.; AYDINER, C.; DEMIRBAS, E. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, n190, p. 201-2011, 2006.

LEÃO, R. M. A floresta e o Homem. Editora da Universidade de São Paulo – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 2000.

LEITE, J. C. A. Estudo de um reator para eletroflotação de águas residuais da indústria do petróleo visando sua reutilização. Tese de doutorado – UFCG. Campina Grande, 2009.

MERZOUK, B.; GOURIK, B.; SEKKI, A. et al.. Removal Turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique. *Journal of Hazardous Materials*, v164, p. 215-222, 2009.

MIGUEL, P. S. B.; GOMES, F. T.; ROCHA, W. S. D.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, C. A.; OLIVEIRA, A. V. Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. *CES Revista*, v24, 2010.

MORA, A. L. GARCIA, C. H. A Cultura do Eucalipto no Brasil. São Paulo – SP. Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000.

OLIVEIRA, J. S. Tratamento de água produzida utilizando eletroflotação. Dissertação - Universidade de Tiradentes. Brasil, 2012.

PEREIRA, A. F.S. Aplicação da eletroflotação no tratamento de efluente na indústria têxtil. Dissertação - UNICAMP. Campinas, 2007.

RAMALHO, A. M. Z. Estudo de reatores eletroquímicos para remoção de  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , Fenol e BTEX em água produzida. Dissertação - UFRN. Natal, 2008.

RENASEM – Registro Nacional de Sementes e Mudanças. Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/renasem> Acesso em: Dezembro, 2015.

SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Influência do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 24, n. 4, p. 787-796, 2000.

SANTOS, A. C.; CRUZ, S. M.; SOLETTI, J. I.; CARVALHO, S. H.; TONHOLO, J.; ZANTA, C. L. P. S.; MIRAPALHETA, A. Tratamento de Efluentes sintéticos de petróleo utilizando o método da eletroflotação. 4º PDPETRO, Campinas, 2007.

SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura. Disponível em: [www.sbs.org.br](http://www.sbs.org.br) Acesso em: Outubro, 2015.

SILVA, P. H. M., WICHERT, M.C.P., GONÇALVES, J. L. M. Indicadores Estatísticos sobre Viveiros Florestais no Brasil, 2008. Disponível em: <http://www.ipef.br/silvicultura/indicadores.asp> Acesso em: Outubro, 2015.

SOLOMAN, P. A.; BASHA, C. A.; VELAN, M.; BALASUBRAMANIAN, N.; MARIMUTHU, P. Electrochemical degradation of pulp and paper industry waste-water. Wiley interscience, 2009.

STULP, S.; SILVA, C. P.; MARMITT, S. O uso de técnicas eletroquímicas no tratamento de efluente de indústria alimentícia: uma ferramenta para gestão ambiental. Estudo e Debate, Lajeado, v. 12, n. 2, p. 109-123, 2005.

VIEIRA, L. Setor Florestal em Minas Gerais: Caracterização e dimensionamento. UFMG. Belo Horizonte, 2004.

WANG, C. T.; CHOU, W. L.; KUO, Y. M. Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/ electroflotations. Journal of Hazardous Materials, v164, p.81-86, 2009.