

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA AMBIENTAL**

FÁBIO LUIZ FRONZA

**REDUÇÃO DA TOXICIDADE DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO
POR MEIO DO TRATAMENTO EM UM DESTILADOR SOLAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2016

FÁBIO LUIZ FRONZA

**REDUÇÃO DA TOXICIDADE DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO
POR MEIO DO TRATAMENTO EM UM DESTILADOR SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro
Ambiental, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Juliana Bortoli
Rodrigues Mees

Co-orientador: Eduardo Borges Lied

MEDIANEIRA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

REDUÇÃO DA TOXICIDADE DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO POR MEIO DO TRATAMENTO EM UM DESTILADOR SOLAR

por

FÁBIO LUIZ FRONZA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 13:50h do dia 23 de junho de 2016, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dra. Juliana Bortoli Rodrigues Mees
Orientador

Prof. Me. Eduardo Borges Lied
Co-orientador

Prof. Dra. Dangelia Maria Fernandes
Membro titular

Prof. Dra. Alice Jacobus de Moraes
Membro titular

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que, por meio de momentos e pessoas, esteve sempre presente em todas as etapas de minha vida. Meu guia e mestre.

Aos meus pais, Euclides e Glória, pelo amor, carinho e também pelo incansável esforço e dedicação para que eu chegasse até aqui.

Aos meus irmãos, Ana, André e Gabriel pela enorme parceria e pelo cativar constante mesmo em dias sem sol.

A minha colega de curso e namorada Aline Cavalli, que me acompanhou e contribuiu diretamente para a realização deste estudo, tendo sido agente de transformação pessoal e profissional em minha vida.

A minha orientadora Prof. Dra. Juliana Bortoli Rodrigues Mess, pelos ensinamentos, disponibilidade, paciência, confiança, comprometimento e grande parceria no desenvolver dos trabalhos.

Ao meu co-orientador e amigo Prof. Me. Eduardo Borges Lied, pela paciência, disponibilidade, atenção, parceria, confiança e ensinamentos repassados no decorrer dos trabalhos.

A UTFPR, que viabilizou todo o aprendizado adquirido durante a graduação e, conseqüentemente, o desenvolver do presente trabalho.

A Ionara Hoffmann pela atenção e gentileza que muito contribuíram para a realização dos ensaios de ecotoxicidade.

Aos meus amigos Bruna Mayer, Eduardo, Julio, Lucas e Marcio pela ajuda inconsciente fornecida durante os momentos em que estivemos juntos.

A todos aqueles que, de alguma maneira, estiveram presentes e foram agentes de mudança para que este estudo se concretizasse.

RESUMO

FRONZA, Fábio Luiz. **Redução da Toxicidade de Lixiviado de Aterro Sanitário por Meio do Tratamento em um Destilador Solar**. 2016. 45 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

O lixiviado, caracterizado por sua coloração escura e forte odor característico, possui em sua composição material coloidal dissolvido e também em suspensão, que detém grande potencial poluidor. O tratamento físico-químico é o mais comum a ser adotado para esse tipo de efluente. De maneira a adotar tecnologias alternativas de baixo custo para seu tratamento, buscou-se verificar a eficiência de um destilador solar de bancada no tratamento do lixiviado de um aterro sanitário da região Oeste do Paraná, com base na redução da concentração dos parâmetros físico-químicos Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, Condutividade, Nitrogênio amoniacal, Cor, Turbidez e, também, da ecotoxicidade (CL50;24h). O destilador utilizado nos ensaios foi construído todo em vidro de espessura 3mm, sendo do tipo uma água, de simples efeito e funcionamento em batelada, com área útil de 0,5 m² e inclinação da cobertura de 20°. Adicionou-se aproximadamente 7 L de lixiviado ao destilador, que foi lacrado e reaberto somente após o término dos ensaios. Realizou-se 3 ensaios de destilação, os quais tiveram duração de 8 horas. Ao final de cada ensaio o destilado foi caracterizado individualmente com base nos parâmetros anteriormente descritos. Os ensaios de ecotoxicidade foram realizados utilizando o microcrustáceo indicador *Artemia salina*. Obteve-se um rendimento médio de aproximadamente 1,6 L m⁻² d⁻¹ de efluente tratado (destilado). Observou-se uma redução média de 99% nos parâmetros DQO, Cor e Turbidez nos destilados quando em comparação ao efluente bruto. O parâmetro condutividade apresentou redução média de 50% e a concentração de nitrogênio amoniacal subiu, em média, 14% nos destilados em comparação ao efluente bruto. O efluente bruto e destilados dos ensaios 1, 2 e 3, apresentaram respectivamente CL50;24h de 24,55%, 23,05%, 23,04% e 20,59% e pH de 7,98; 9,08; 9,08 e 8,99. Mesmo apresentando alta eficiência na redução de alguns parâmetros, os destilados eram mais tóxicos que o efluente bruto. Este fato deve-se provavelmente devido a presença de amônia livre (NH₃) nos destilados, que em altas temperaturas e condições adequadas de pH (>7) é passível de volatilização. Acredita-se que durante o processo de destilação, a amônia livre presente no efluente tenha se volatilizado devido ao aumento da temperatura e condensado junto ao vapor d'água, conferindo o efeito tóxico aos destilados. Isto justificaria, também, o leve aumento do pH e altas condutividades do destilado, além do aumento nas concentrações de nitrogênio amoniacal. Por fim, pode-se dizer que a destilação solar apresenta alta eficiência no tratamento de lixiviado de aterro sanitário quando avaliamos os parâmetros físico-químicos DQO, Cor, Turbidez e Condutividade. Porém, é ineficiente na remoção de nitrogênio amoniacal, uma vez que contribui para o aumento das suas concentrações e, conseqüentemente, da toxicidade do efluente.

Palavras-chave: Resíduos urbanos. Efluentes. Tratamentos alternativos.

ABSTRACT

FRONZA, Fábio Luiz. **Removal of the Toxicity of Landfill Leachate by the Treatment on a Solar Distiller**. 2016. 45 p. Course Conclusion Work (Bachelor in Environmental Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

The landfill leachate, characterized by its dark color and strong characteristic odor, has in its composition dissolved colloidal and also in suspension material, holding on itself a great pollution potential. The physico-chemical treatment is the most common way of treating adopted for this kind of effluent. In order to adopt low-cost alternative technologies for its treatment, it was chosen to verify the efficiency of a solar distiller in the treatment of landfill leachate from a landfill located in western Paraná, based on the reducing of the concentration of the following physicochemical parameters Chemical Oxygen Demand (COD), pH, conductivity, ammonia nitrogen, Color, Turbidity and also ecotoxicity (CL50; 24h). The solar distiller used in the tests was constructed entirely in glass thickness 3 mm, “one water” type, single acting and operating in batch, with an area of 0,5 m² and 20° inclination on the cover. It was added approximately 7L of leachate to the distiller, which was sealed and reopened only after completing the tests. The distillation assays were carried out on 3 trials, which had a duration of 8 hours each. At the end of each test the distiller was individually characterized based on the parameters described above. The ecotoxicity tests were performed using the indicator microcrustacean *Artemia salina*. It was obtained as an average a yield of approximately 1,6 L m⁻² d⁻¹ of treated effluent (distilled). There was a mean reduction of 99% in the COD parameter, color and turbidity in the distillate as compared to the raw leachate. The conductivity parameter showed a mean reduction of 50% and the ammonia concentration rose on average 14% in distillates compared to the raw leachate. The raw leachate and the distillates of the tests 1, 2 and 3, respectively showed LC50;24h of 24,55%, 23,05%, 23,04% and 20,59% and a pH of 7,98; 9,08; 9,08 and 8,99. Even presenting high efficiency in reduction some parameters, the distillates were more toxic than the raw leachate. This fact is probably due to the presence of free ammonia (NH₃) in the distillates, which at high temperatures and suitable conditions of pH (>7) can be volatilized. It is believed that during the distillation process, the free ammonia present in the leachate has volatilized due to the increase of temperature, being condensed with the water vapor, giving a toxic effect to the distillates. This justifies also the slight increase of pH and high conductivities of the distillates, in addition to increasing ammonia concentrations. Finally, we say that solar distillation has a high efficiency in the treatment of landfill leachate when evaluating the physicochemical parameters COD, Color, Turbidity and Conductivity. However, it is inefficient in removing ammonia as it contributes to the increase of their concentrations and consequently the toxicity of the effluent.

Key words: Urban waste. Wastewater. Alternative treatments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Fatores associados à composição do lixiviado.....	14
Figura 02: Esquema de um destilador solar duas águas.....	20
Figura 03: Destilador solar utilizado nos ensaios.....	22
Figura 04: Detalhe do sistema de coleta do destilado e termômetro utilizado.....	23
Figura 05: Lagoa de conteção (à esquerda) com detalhe do ponto de coleta (à direita).....	24
Figura 06: Esquema dos testes de ecotoxicidade.....	27
Figura 07: Esquema representativo dos ensaios de ecotoxicidade.....	27
Figura 08: Exemplo de gráfico da concentração da amostra em relação à mortalidade.....	28
Figura 09: Efluente bruto (à esquerda) e efluente tratado (à direita).....	30
Figura 10: Variação da condutividade e da concentração de amônia durante os ensaios.....	32
Figura 11: Aumento da toxicidade do efluente tratado em relação ao efluente bruto.....	32
Figura 12: Relação entre a variação da concentração de amônia e pH observado durante o experimento	34
Figura 13: Distribuição da amônia livre (NH ₃) e do íon amônio (NH ₄ ⁺) em função do pH a uma temperatura de 25°C.....	34
Figura 14: Gráficos da relação concentração da amostra e mortalidade em cada ensaio.....	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Composição do lixiviado de aterro sanitário segundo diferentes estudos.....	15
Quadro 02: Exemplos de organismos utilizados nos testes de ecotoxicidade.....	18
Quadro 03: Parâmetros analisados e métodos utilizados.....	25
Quadro 04: Análises de metais.....	25
Quadro 05: Capacidade produtiva de destiladores no Brasil.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Análises de metais realizadas para o efluente bruto.....	30
Tabela 02: Caracterização físico-química e ecotoxicológica do eluente bruto e destilados.....	31
Tabela 03: Mortalidade média com base em uma duplicata para cada concentração da amostra.....	33
Tabela 04: Temperaturas da face externa (Tfe) e temperaturas ambiente (Tamb) registradas durante os ensaios de destilação solar.....	35
Tabela 05: Caracterização ecotoxicológica de lixiviado de aterro sanitário (pós-tratamento) por diferentes autores.....	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO.....	14
3.2 TESTES ECOTOXICOLÓGICOS.....	16
3.3 DESTILAÇÃO SOLAR	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1 DESTILADOR SOLAR	22
4.2 AMOSTRAGEM	24
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA E ECOTOXICOLÓGICA DO EFLUENTE	24
4.4 ENSAIOS ECOTOXICOLÓGICOS.....	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 DESTILAÇÃO SOLAR	29
5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA E ECOTOXICOLÓGICA DO EFLUENTE BRUTO E TRATADO	30
6 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Em virtude das intensas atividades extrativistas que visam atender a demanda industrial e, conseqüentemente, satisfazer a necessidade humana de consumo, a poluição e o desgaste dos recursos naturais caracterizam-se como um enfrentamento ao desafio imposto à atual sociedade: produzir mais e poluir menos.

Junto aos grandes índices de aumento do consumo, aumenta-se também o volume de resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários, que dentre vários passivos ambientais, gera grande quantidade de efluente resultante da decomposição da matéria orgânica presente na massa de resíduos, o chorume.

Quanto à gestão de aterros sanitários, muitas vezes públicos, observa-se a problemática gerada pelo grande volume de lixiviado (solução de água e chorume que contém materiais dissolvidos ou suspensos) gerado, que possui grande potencial poluidor e caracteriza-se por ser de difícil tratamento.

Especificamente acerca da legislação ambiental, a restrição quanto à qualidade dos efluentes lançados aos corpos receptores pode ser intensificada quando consideramos a adoção dos ensaios ecotoxicológicos, que objetivam avaliar de maneira sistêmica a interação entre as substâncias poluentes e o meio, vindo a exaltar quais os efeitos do despejo de águas residuárias em corpos hídricos.

É comum que mesmo após ter recebido o tratamento adequado e tendo todos os parâmetros biológicos e físico-químicos reduzidos de maneira a atender os limites estabelecidos pela legislação vigente, alguns efluentes ainda apresentem efeito tóxico aos ecossistemas.

O emprego de novas tecnologias e métodos de tratamento de efluentes busca, de maneira geral, promover a despoluição da água utilizando meios alternativos aos convencionais, tendo como objetivos indiretos a redução de custos e maiores facilidades técnicas quanto à implantação desses métodos.

Ainda a respeito das novas tecnologias no tratamento de efluentes, o aproveitamento da energia solar para despoluição e purificação da água tem se mostrado como uma boa alternativa para regiões de maior incidência de radiação solar, com métodos de fácil implantação e de custo reduzido, como a destilação solar.

A destilação solar destaca-se por ser, basicamente, caracterizada por um processo natural de evaporação da água, onde grande parte dos poluentes não sofre transferência de fase e podem ser separados do efluente.

Mesmo que diversos estudos apresentem resultados promissores, a avaliação da redução da toxicidade por meio da destilação solar é pouco pesquisada, fazendo deste um assunto atrativo para novos trabalhos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência de redução da toxicidade de lixiviado de aterro sanitário por meio do tratamento em um destilador solar.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar físico-química e ecotoxicologicamente o lixiviado de aterro sanitário;
- Construir de um módulo de bancada para destilação solar;
- Determinar a eficiência da destilação solar na redução dos parâmetros físico-químicos e ecotoxicológicos do lixiviado de aterro sanitário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

Caracterizado por ser um líquido escuro e de odor característico desagradável, o lixiviado de aterro sanitário é uma solução aquosa dos produtos da decomposição bioquímica da massa de resíduos depositados no aterro, que é carregado pela água da chuva e pela própria umidade da massa de resíduos, contendo alta carga orgânica e inorgânica (MORAVIA, 2010).

É interessante ressaltar que lixiviado diferencia-se conceitualmente de chorume. De acordo com Bidone (2007), o termo chorume deve ser utilizado quando tratamos apenas do líquido proveniente da decomposição anaeróbia da massa de resíduos. Por outro lado, o fluxo de água pelos vazios da massa sólida promove o contato e mistura da água com o chorume, resultando em uma mistura de líquidos que, modernamente, conceitua-se como lixiviado.

O lixiviado caracteriza-se por ser a principal fonte de poluição em aterros sanitários, apresentando grande potencial de poluição para as águas superficiais e, principalmente, subterrâneas. (SÁ et al., 2012). Sua composição química e microbiológica é bastante complexa e variável, como se observa no Quadro 01, uma vez que depende diretamente das características ambientais e de operação do aterro em questão, além das características dos resíduos depositados (SILVA, 2009).

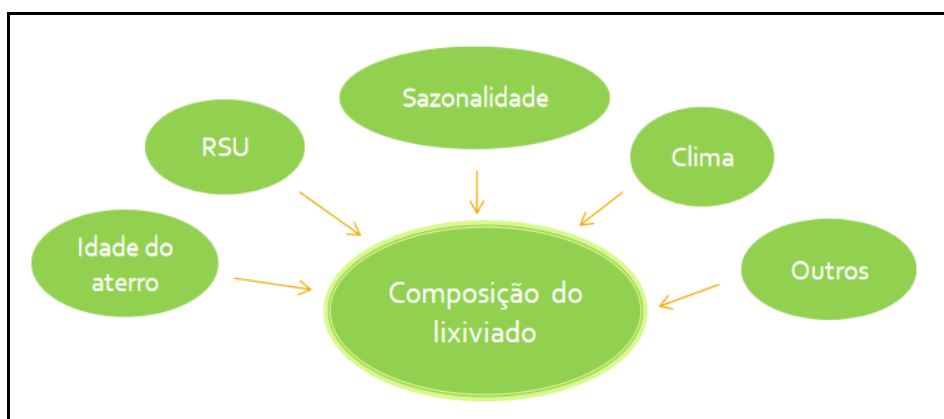


Figura 01: Fatores associados à composição do lixiviado
Fonte: REIS (2014)

El-Fadel et al. (2002) ainda traz como fatores que justificam a alta variabilidade da composição do lixiviado de aterros sanitários a idade do aterro, e também, a decomposição físico-química da matéria presente na massa de resíduos.

Parâmetro	Valor observado em diferentes estudos			
	LANGE et al. (2006) ¹	ALBUQUERQUE, E. M. (2012) ²	TURETTA (2011) ³	SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. (2000) ⁴
DQO (mg/L)	2.313,00	4.642,00	5.235,00	96.000,00
DBO (mg/L)	300,00	1.035,00	-	-
pH	7,70	8,40	8,40	6,90
Nitrogênio Total (mg/L)	102,00	2.240,00	2.956,00	-
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	184,00	1.574,00	2.261,00	1.135,00
Sólidos em suspensão totais (mg/L)	48,00	170,00	176,00	-
Arsênio total (mg/L)	0,11	-	-	-
Cádmio total (mg/L)	0,005	0,03	0,82	-
Chumbo total (mg/L)	<0,01	0,09	0,14	-
Cobre total (mg/L)	<0,01	0,05	0,10	365,00
Cromo trivalente (mg/L)	<0,05	-	-	-
Cromo hexavalente (mg/L)	<0,1	-	-	-
Cromo total (mg/L)	-	0,36	0,43	-
Ferro solúvel (mg/L)	0,50	3,02	7,26	-
Mercúrio total (mg/L)	<0,001	-	-	-
Níquel total (mg/L)	0,18	0,31	0,43	-
Zinco total (mg/L)	0,09	0,42	2,02	175,00

Quadro 01: Composição do lixiviado de aterro sanitário segundo diferentes estudos

Notas:

(*) Os espaços marcados com um traço ('-') indicam a não avaliação do parâmetro no referido estudo;

¹ Aterro sanitário de Belo Horizonte-MG, 2005;

² Aterro sanitário de São Carlos-SP, 2011;

³ Aterro sanitário de São Carlos-SP, 2007;

⁴ Aterro sanitário de Bauru-SP, 1999.

Uma vez que as características físico-químicas do lixiviado de aterro sanitário por vezes se assemelham às do esgoto doméstico, é comum a adoção de tratamentos biológicos para a remoção de sua carga poluidora. (LANGE et al., 2006).

Contudo, por ser constituído por compostos recalcitrantes de difícil remoção via processos biológicos, torna-se recorrente a adoção de tratamentos físicos químicos, que visam remover ou promover a mineralização da matéria poluente refratária, como a coagulação e floculação, processos oxidativos avançados (POA) e adsorção em carvão ativado (SILVA, 2009).

Gotvjan et al. (2009) enfatizam que a adoção de tratamentos biológicos ou físico químicos, como o tratamento por lodos ativados, comumente apresentam baixas eficiências na remoção de algumas substâncias, fazendo com o que o lixiviado apresente toxicidade mesmo após passar pelo tratamento proposto. Há dois motivos pelos quais os sistemas biológicos e físico-químicos apresentem baixa eficiência na remoção das substâncias tóxicas, que seriam a presença significativa de compostos orgânicos de alto peso molecular e, também, o efeito inibitório desses compostos orgânicos, sais inorgânicos e metais pesados aos microorganismos presentes no tratamento.

Tendo em vista a necessidade de constante aprimoramento do controle à poluição, o uso de novas ferramentas, como o controle ecotoxicológico em efluentes, vêm se mostrando necessário. Sob um aspecto legal, observa-se a preocupação quanto a essa necessidade. Nesse contexto, citam-se a Resolução CONAMA 430/2011, que no Artigo 18 da Seção II, dispõe sobre a obrigatoriedade do controle ecotoxicológico de efluentes (CAMPOS; PIVELI, 2016), e também a Resolução Estadual CEMA/PR 081/2010, que fixa critérios e padrões de emissão relativos a ecotoxicidade de efluentes líquidos para lançamentos em corpos d'água receptores.

3.2 TESTES ECOTOXICOLÓGICOS

Mesmo que possua grande disponibilidade hídrica, o Brasil sofre com a ausência de água – tanto em qualidade quanto em quantidade – em algumas de suas regiões. Atender à demanda populacional de modo a controlar os passivos ambientais ocasionados pelo uso direto dos recursos hídricos é fator determinante a ser resolvido (SILVA, 2014).

Com o objetivo de um maior controle da qualidade ambiental, a análise de qualidade das águas e águas residuárias pode ser realizada de duas formas

distintas: química e biológica. Por meio da forma química, pode-se identificar e quantificar substâncias, enquanto que a biológica estuda os efeitos por elas causados. Nesse contexto, caracterizam-se os testes ecotoxicológicos, também chamados bioensaios, que medem os efeitos de substâncias individuais, ou de uma mistura de substâncias, em organismos vivos (KNIE, 1998).

A ecotoxicidade vem a ser um parâmetro de grande importância quando se pretende avaliar a eficiência de sistemas de tratamento, uma vez que os níveis de toxicidade nem sempre acompanham o padrão de remoção dos parâmetros físico-químicos convencionais, ou seja, mesmo que dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente, alguns efluentes tratados ainda podem conter efeitos tóxicos (REIS, 2014).

Isso pode acontecer uma vez que, quando em contato, diferentes substâncias podem apresentar efeitos combinados, de maneira a aumentar ou reduzir seus efeitos tóxicos, podendo apresentar efeitos aditivos, sinérgicos ou antagônicos (COSTA et al., 2008).

- Efeitos aditivos: a toxicidade da mistura é igual à soma da toxicidade das substâncias de maneira individual;
- Efeitos sinérgicos: a toxicidade da mistura é maior que a soma da toxicidade das substâncias de maneira individual;
- Efeitos antagônicos: a toxicidade da mistura é menor que a soma da toxicidade das substâncias de maneira individual.

Com base nisso, diz-se que os testes ecotoxicológicos permitem avaliar em que medidas tais substâncias são nocivas, além de detectar como e onde se observam seus efeitos. Os testes consistem na exposição de organismos vivos, por determinado período de tempo, a diferentes concentrações de uma amostra de água, efluente ou substância. Ao final, é possível observar alterações físicas, morfológicas ou comportamentais nos organismos, causadas pela exposição à amostra (MAGALHÃES; FERRÃO, 2008).

Pode-se diferenciar os testes em dois tipos: agudos e crônicos. Os testes agudos geralmente avaliam uma resposta rápida (0 a 96 horas de exposição), e os efeitos comumente observados são a mortalidade ou em alguns casos, o evento que a antecede, como a imobilidade. Para avaliar os efeitos agudos é recorrente o uso

da CE50 (concentração efetiva que causa mortalidade ou imobilidade a 50% dos organismos teste) (CESAR et al., 1997). Quando tratamos da mortalidade, utiliza-se o parâmetro CL50, que é a concentração de determinada substância que causa a morte de 50% dos organismos e é o mais utilizado para fins de estudo da ecotoxicidade. Assim, os testes de toxicidade crônica avaliam a resposta a um estímulo que continua a longo prazo, excedendo 1/10 do ciclo vital e se estendendo até a totalidade da vida do organismo. Neste caso, os efeitos geralmente não apresentam letalidade, mas acarretam uma ou mais disfunções biológicas aos organismos teste.

Os testes de ecotoxicidade são feitos utilizando-se organismos aquáticos vivos que respondem à ação do poluente em estudo. A escolha do organismo a ser utilizado depende de diversos fatores, como a simplicidade do teste, as características do organismo (habitat, ciclo de vida, sensibilidade), exigência legal, objetivo do teste e demais (REIS, 2014). O Quadro 02 indica alguns exemplos de grupos e espécies de organismos amplamente utilizados nos testes de ecotoxicidade.

Tipo de organismo	Exemplos
Microrganismos	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
	<i>Aliivibrio fisheri</i>
	<i>Spirillum sp</i>
Plantas e algas	<i>Scenedesmus subspicatus</i>
	<i>Dunaliella tertiolecta</i>
	<i>Lemna minor</i>
	<i>Lactuca sativa</i>
Invertebrados	<i>Daphnia magna</i>
	<i>Ceriodaphnia dubia</i>
	<i>Artemia salina</i>
	<i>Paracentrotus lividius</i>
Peixes	<i>Danio rerio</i>
	<i>Oncorhynchus mykiss</i>
	<i>Pimephales promelas</i>

Quadro 02: Exemplos de organismos utilizados nos testes de ecotoxicidade.
Fonte: REIS (2014)

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n. 430/2011, cabe ao órgão ambiental competente a especificação dos organismos e métodos de ensaio a serem utilizados nos testes de ecotoxicidade. E observando-se o disposto no Anexo I da Resolução Estadual do Conselho Estadual do Meio Ambiente - CEMA/PR n. 081/2010, podem ser utilizados para testes ecotoxicológicos, de acordo com as devidas disposições, os seguintes organismos: *Aliivibrio fisheri* (bactéria marinha), *Daphnia magna* (microcrustáceo de água doce), *Ceriodaphnia dubia* (microcrustáceo de água doce) e, *Scenedesmus subspicatus* (alga clorífica de água doce).

Por se tratar de um organismo de fácil manutenção em laboratório, larga distribuição comercial e grande acessibilidade técnica, a *Artemia salina* vem sendo largamente utilizada em estudos para determinação do efeito tóxico de substâncias ao ecossistema aquático. O teste com *Artemia salina* consiste, basicamente, na exposição dos náuplios (estágio larval do microcrustáceo) a crescentes concentrações da amostra que se pretende avaliar (PIMENTEL et al., 2011).

Verificando-se a importância da correta avaliação e controle de qualidade do lançamento de efluentes, caracteriza-se como um desafio o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem o tratamento de águas residuárias e efluentes industriais, reduzindo sua carga poluidora e, conseqüentemente, efeitos nocivos aos ecossistemas aquáticos de corpos hídricos receptores. Neste contexto, a destilação solar configura uma alternativa de tecnologia limpa que além de causar prejuízo mínimo ao meio ambiente, faz aproveitamento da abundante e também gratuita energia solar (BEZERRA, 2004).

3.3 DESTILAÇÃO SOLAR

A destilação solar utiliza energia solar (direta e difusa), onde a água passa por um processo natural de purificação que envolve a evaporação e condensação. É comum que esse processo seja reproduzido em pequena escala, uma vez que o custo dessa tecnologia é relativamente alto (MALUF, 2005).

Ainda de acordo com o autor, o processo de purificação ocorre nos destiladores solares, que consistem em tanques rasos, totalmente estanques e com

cobertura de vidro transparente. Ao atravessar o vidro, a radiação solar atinge o líquido, aquecendo-o e incrementando sua taxa de evaporação. O vapor sobe e condensa ao entrar em contato com o vidro mais frio. A água então destilada escorre pelo vidro onde é coletada por canaletas que a encaminham para um reservatório, conforme se observa na Figura 02. Os módulos de destilação solar mais comuns são os de uma e duas águas. Essa denominação relaciona-se ao número de superfícies condensantes (cobertura de vidro) que o destilador possui. Caso possua apenas uma, denomina-se uma água e, duas águas quando há duas (Figura 02).

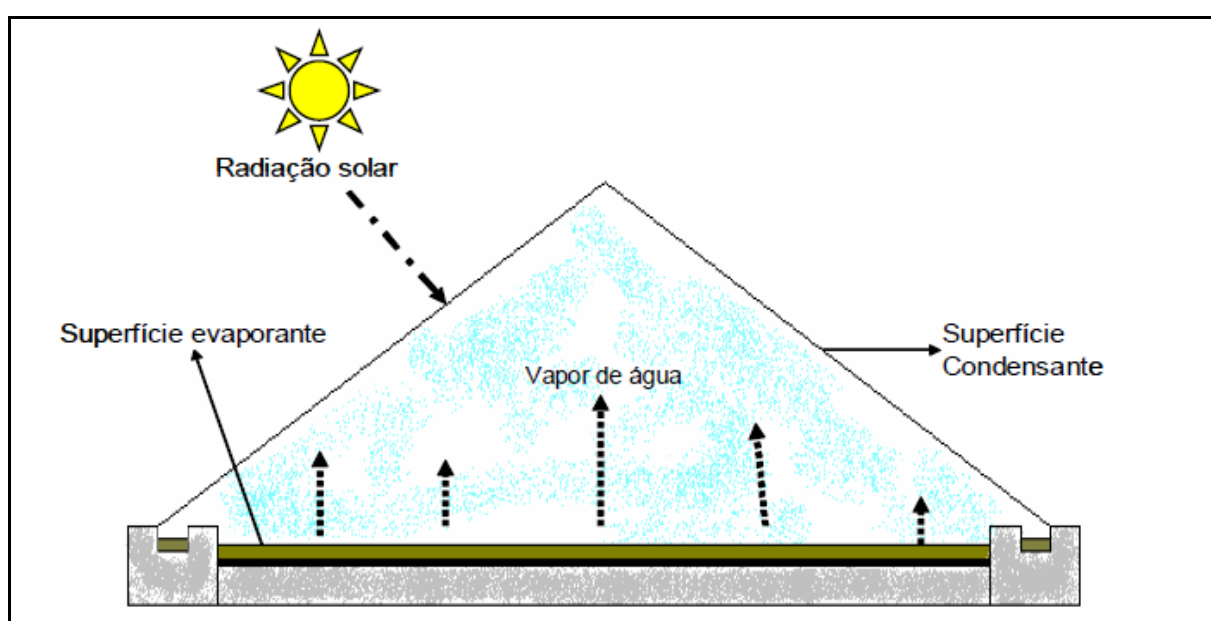


Figura 02: Esquema de um destilador solar duas águas
Fonte: Sá et al. (2012)

Após a coleta, o líquido destilado já apresenta grande pureza e é livre da maioria das impurezas, também deixando para trás os sais, minerais e microrganismos nocivos à saúde humana (SÁ et al., 2012).

Estudos indicam que por meio da destilação solar de efluentes de aterro sanitário, além dos industriais, domésticos e até mesmo de laboratórios químicos é possível obter grandes reduções nas concentrações de poluentes. Sá et al. (2012) verificaram que quando aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário, o destilado apresentou redução de 100% da turbidez, cor e sólidos totais (ST). Também, reduziu os parâmetros demanda química (DQO), demanda bioquímica (DBO) e coliformes termotolerantes a níveis aceitáveis pela Resolução CONAMA n. 430/2011.

Ramos (2009) constatou que o destilado de água de produção de petróleo apresentou redução de sais superiores a 97%, de condutividade (26,8 mS/cm para 14,6 μ S/cm), e pH de 10 para 7, em média, em um destilador solar tipo duas águas com área de 1 m².

Bezerra (2004) verificou, ainda, redução da concentração de carbono orgânico total (COT) da água de produção de petróleo de mais de 90% ao utilizar um destilador solar tipo duas águas, com rendimento médio de 5,0 L m⁻² d⁻¹.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 DESTILADOR SOLAR

O destilador solar utilizado para o experimento foi confeccionado em um modelo de simples efeito com funcionamento em batelada. Possui face superior única, sendo do tipo uma água (Figura 03) com inclinação de 20°. Sua base é de formato retangular com dimensões de 100 x 50 cm. Na região de encontro da face superior com a base fixou-se uma calha responsável pelo recolhimento do destilado, encaminhando-o a um recipiente coletor.

Tanto a base como suas faces laterais e superior foram confeccionadas em vidro comum incolor de espessura 3 mm. Suas dimensões são de 100 x 50 x 20 cm (comprimento x largura x altura maxima das faces laterais).



Figura 03: Destilador solar utilizado nos ensaios.

O experimento foi realizado no município de Medianeira-PR, no período de 17 a 19 de abril de 2016. Durante esse período, realizou-se um total de 3 ensaios, com duração de 8 horas cada, iniciando-se às 10:00 e sendo finalizado às 18:00 horas.

No primeiro dia de ensaios adicionou-se um total de 7 L de lixiviado ao destilador solar, que foi lacrado impedindo a troca gasosa com o ambiente.

O destilador ficou orientado para o norte de maneira a garantir que sua face superior recebesse insolação durante todo o tempo de ensaio. Durante as 8 horas diárias de exposição ao sol, a temperatura externa da face lateral de vidro e a temperatura ambiente eram aferidas a cada duas horas utilizando-se termômetros de mercúrio com limite máximo de medição de 50°C.

Ao final de cada ensaio o efluente tratado (líquido destilado) foi transferido do recipiente coletor para um frasco plástico e refrigerado. Feito isso, o destilador foi coberto e a saída de líquido isolada até o dia seguinte quando se iniciava o próximo ensaio.

Na Figura 04 é mostrado de forma ilustrativa o termômetro utilizado (à esquerda), bem como o recipiente coletor do destilado (à direita).

O rendimento do destilador solar foi determinado apenas pelo volume de destilado produzido por dia ($L \cdot dia^{-1}$), não tendo sido calculado sua eficiência devido à ausência de dados de irradiância.



Figura 04: Detalhe do sistema de coleta do destilado e termômetro utilizado

O volume de lixiviado adicionado no primeiro dia de experimento foi reduzindo gradualmente durante os ensaios devido ao processo natural da evaporação e

condensação, este volume no entanto não foi reposto, tendo o destilador sido reaberto somente após o término dos ensaios.

4.2 AMOSTRAGEM

A amostra utilizada nos ensaios foi o efluente proveniente da lagoa de contenção de lixiviado de um aterro sanitário localizado no Oeste do Paraná. A amostragem seguiu os padrões recomendados pela norma NBR 9898 (ABNT,1987). O lixiviado foi coletado no ponto de entrada da lagoa, vindo diretamente da massa de resíduos uma vez que este é recirculado, conforme observa-se na Figura 05. Realizou-se uma única coleta, sendo coletado um volume de aproximadamente 20 L de lixiviado.



Figura 05: Lagoa de conteeção (à esquerda) com detalhe do ponto de coleta (à direita)

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ECOTOXICOLÓGICA DO EFLUENTE

As análises físico-químicas e ecotoxicológicas foram realizadas nas dependências da UTFPR câmpus Medianeira, com exceção das análises de metais que foram realizadas em laboratório particular.

De maneira a caracterizar o efluente utilizado, foram realizados ensaios em duplicata para determinação dos parâmetros informados pelo Quadro 03. As análises de metais realizadas estão dispostas no Quadro 04.

Parâmetro	Método	Unidade
pH	Potenciométrico ¹	-
DQO	Colorimétrico ²	mg.L ⁻¹
Turbidez	Nefelométrico ³	NTU
Condutividade	Condutimétrico ⁴	μS.cm ⁻¹
Cor	Colorimétrico ⁵	mg Pt.L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal	Colorimétrico ⁶	mg.L ⁻¹
CL50;24h	Ecotoxicológico	mg.L ⁻¹

Quadro 03: Parâmetros analisados e métodos utilizados

¹ pHmetro de bancada Hanna;

² Procedimentos segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 5220D* (APHA, 2012), utilizando o equipamento espectrofotômetro (Modelo FEMTO 700 plus)

³ Análises segundo procedimentos do Manual Turbidímetro AP 2000 do microprocessador portátil Turbidímetro (Modelo AP 2000)

⁴ Condutivímetro de bancada;

⁵ Espectrofotômetro FEMTO 700 plus – 618 nm

⁶ Utilizou-se o kit para determinação de Nitrogênio amoniacal do espectrofotômetro *Spectroquant PHARO 300, Merck*[®]

Parâmetro	Método
Níquel total	Espectrométrico por emissão de plasma ¹
Arsênio total	Espectrométrico por emissão de plasma ¹
Cádmio total	Espectrométrico por emissão de plasma ¹
Chumbo total	Espectrométrico por emissão de plasma ¹
Cobre	Espectrométrico por emissão de plasma ¹
Ferro total	Espectrométrico por absorção atômica de chama ²
Manganês total	Espectrométrico por emissão de plasma ¹
Mercúrio total	Espectrométrico por absorção atômica de vapor a frio ³
(Continua)	

(Conclusão)	
Zinco total	Espectrométrico por emissão de plasma ¹
Cromo hexavalente	Colorimétrico ⁴
Cromo trivalente	Colorimétrico ⁴

Quadro 04: Análises de metais

¹. Determinação pelo método 3120B (APHA et al., 2012)

². Determinação pelo método 3111B (APHA et al., 2012)

³. Determinação pelo método 3112B (APHA et al., 2012)

⁴. Determinação pelo método 3500 Cr – B (APHA et al., 2012)

O efluente tratado, ou destilado, foi caracterizado segundo os parâmetros descritos no Quadro 03. No caso, para cada dia obteve-se um volume de destilado, que foi acondicionado e caracterizado de maneira individual.

4.4 ENSAIOS ECOTOXICOLÓGICOS

A determinação da toxicidade aguda do efluente foi feita a partir do método proposto por Meyer (1982), com adaptações, sendo todos os testes realizados em duplicata.

O organismo indicador utilizado foi a *Artemia salina*, um microcrustáceo comumente utilizado como alimento vivo para peixes e de fácil cultivo. Utilizou-se cistos de *Artemia salina* comerciais para a realização dos ensaios, facilmente encontrados em casas de pesca.

De maneira a se obter a eclosão dos cistos de *Artemia salina*, estes foram dispostos em um béquer de 500 mL contendo solução de água salina: 17 mg L⁻¹ de cloreto de sódio (NaCl) e água destilada. O béquer permaneceu sob iluminação constante (lâmpada de 20W) durante todo o período de incubação. Após o período de incubação de 48 h, os microcrustáceos eram coletados utilizando uma pipeta de Pasteur e transferidos para os béqueres contendo as diluições (Figura 06), que por vez eram protegidos por plástico filme, que continha vários furos pequenos para permitir a troca gasosa, de maneira a evitar que pequenos insetos acabassem pousando no líquido.



Figura 06: Esquema dos testes de ecotoxicidade

De maneira a se obter a CL50;24h, em média 10 exemplares de microcrustáceos vivos foram transferidos a cada um dos béqueres contendo 5 mL de solução – amostra e água salina – em diferentes concentrações da amostra: 6,25%, 12,50%, 25%, 50%, 100% e controle (água salina), conforme se observa na Figura 07. O ideal é adicionar o mesmo número de organismos a cada béquer, porém devido às dificuldades em coletá-los o número variou para este estudo.

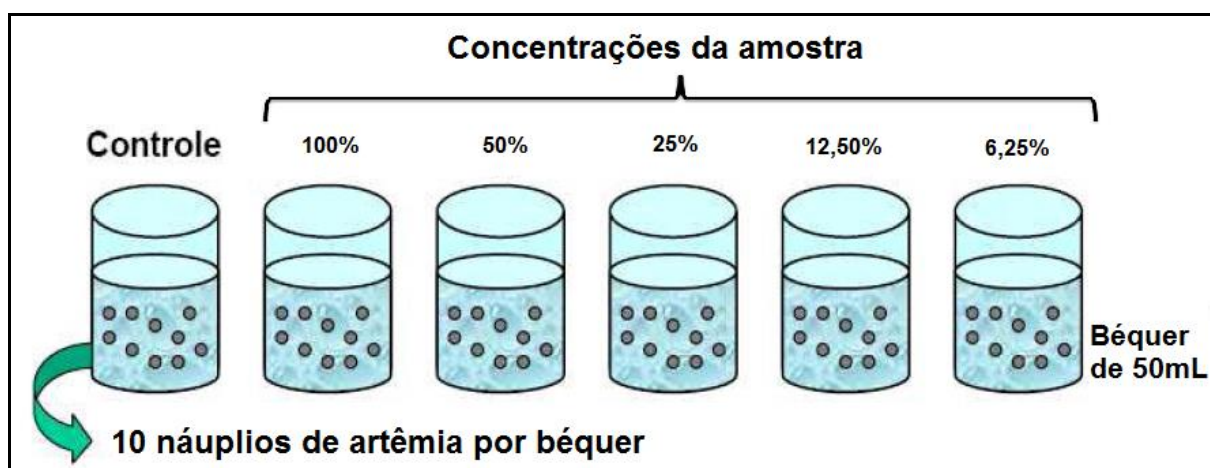


Figura 07: Esquema representativo dos ensaios de ecotoxicidade
Fonte: Adaptado Brentano (2006)

Adicionou-se também uma gota de solução de levedura seca (fermento biológico) em suspensão a cada um dos béqueres. Para a fabricação da solução em suspensão, adicionou-se aproximadamente 2 g de fermento em um béquer com 50 mL de água destilada. Após 24h realizou-se a contagem do número de organismos sobreviventes, sendo a CL50;24h obtida por meio do ajuste logarítmico do eixo da

abscissa. Graficamente, a CL50;24h é obtida ao plotar-se o gráfico da concentração da amostra (abscissa) em relação à porcentagem de mortalidade (ordenada), conforme observa-se na Figura 08.

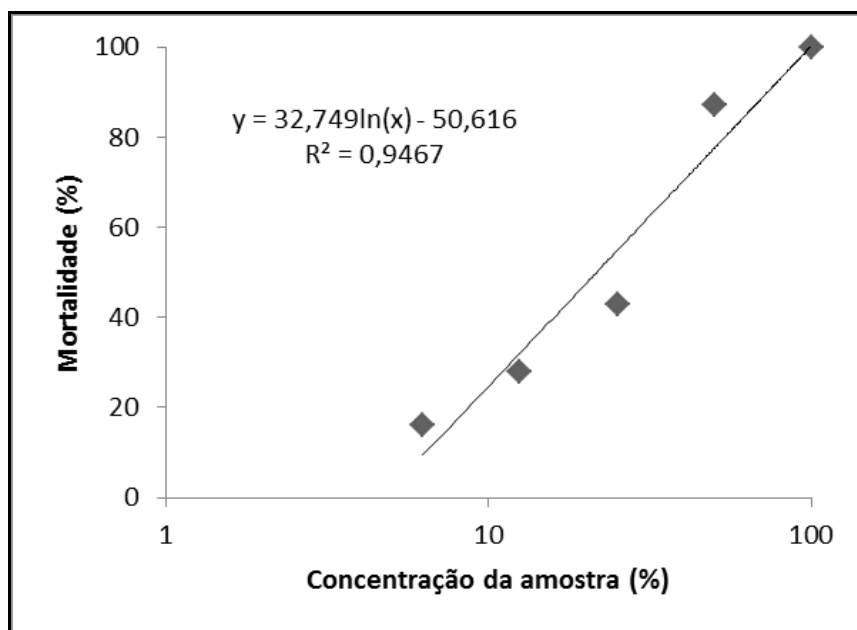


Figura 08: Exemplo de gráfico da concentração da amostra em relação à mortalidade

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DESTILAÇÃO SOLAR

Determina-se o rendimento de um destilador a partir do volume de destilado produzido por unidade de área ocupada pelo destilador. No Quadro 05 pode-se observar o rendimento de outros destiladores utilizados em estudos anteriores no Brasil.

Durante os ensaios observou-se uma produção média de destilado de 1,50 L m⁻² d⁻¹. Tal índice apresenta-se abaixo de grande parte daqueles observados no Quadro 05, tendo sido superior ao obtido por Soares (2001), que obteve uma produção de 1,30 L m⁻² d⁻¹. Contudo, uma vez que a produção varia de acordo com o tipo de destilador, sazonalidade, posicionamento geográfico e demais fatores ambientais e operacionais de cada caso, recomenda-se o uso de dados de radiância para que se possibilite o cálculo da real eficiência de um destilador solar, permitindo uma comparação menos subjetiva entre os resultados obtidos por diversos autores.

Autor	Produção (L m ⁻² d ⁻¹)	Tipo do destilador	Local do estudo
Ribeiro e Nunes (1983)	3,4 a 5,2	uma água	Fortaleza-CE
Torres (1984)	4,1	uma água	Paraíba
STEC (1984)	5,0	uma água	Recife-PE
Senem (2000)	3,5	-	Florianópolis-SC
Soares (2001)	1,3	-	Florianópolis-SC

Quadro 05: Capacidade produtiva de destiladores no Brasil

Fonte: Adaptado de SOARES (2004).

Os dados de radiação solar (irradiância) não foram obtidos uma vez que a placa solar disponível no câmpus Medianeira da UTFPR encontra-se inativa, impossibilitando aquisição de dados e, conseqüentemente, os cálculos da eficiência do destilador.

O destilado obtido apresentou visível redução de sua cor original (Figura 09), além de ter seu odor característico de nitrogênio amoniacal intensificado após o tratamento. Essas características mantiveram-se para os destilados ao longo dos três ensaios realizados no trabalho.



Figura 09: Efluente bruto (à esquerda) e efluente tratado (à direita)

5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ECOTOXICOLÓGICA DO EFLUENTE BRUTO E TRATADO

Dos parâmetros analisados (Quadro 03), tanto o efluente bruto quanto os destilados foram caracterizados de maneira a se observar a eficiência do tratamento via destilação solar. As análises de metais foram realizadas somente para o efluente bruto e os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 01.

Tabela 01: Análises de metais realizadas para o efluente bruto

Parâmetro	Valor observado (mg L ⁻¹)	Valor máximo aceitável ^a (mg L ⁻¹)
Níquel total (Ni)	0,21	2,00
Arsênio total (As)	<0,001	0,50
Cádmio total (Cd)	<0,001	0,20
Chumbo total (Pb)	<0,011	0,50
Cobre (Cu)	<0,011	1,00 ^b
Ferro total (Fe)	4,57	15,00 ^b
Manganês total (Mn)	<0,009	1,00 ^b
Mercúrio total (Hg)	<0,001	0,01
Zinco total (Zn)	0,47	5,00
Cromo hexavalente (Cr 3 ⁺)	<0,05	0,10
Cromo trivalente (Cr 6 ⁺)	0,47	1,00

^a Limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/11

^b Valores estabelecidos para a forma dissolvida da substância

Ao analisarmos as concentrações de metais do efluente bruto e comparando-as com as obtidas por outros autores conforme consta no Quadro 01, confirma-se o fato de que a composição do lixiviado de aterro sanitário é complexa e extremamente variável, uma vez que diversos parâmetros afetam sua formação. Ainda assim, os resultados obtidos assemelham aos verificados por Lange et al. (2006): 0,11 mg As L⁻¹; 0,005 mg Cd L⁻¹; <0,01 mg Pb L⁻¹; <0,01 mg Cu L⁻¹; <0,05 mg Cr₃⁺ L⁻¹; <0,1 mg Cr₆⁺ L⁻¹; 0,50 mg Fe L⁻¹; <0,001 mg Hg L⁻¹; 0,18 mg Zn L⁻¹; 0,09 mg Zn L⁻¹.

Tratando-se da caracterização físico-química que aconteceu tanto para o efluente bruto quanto para os destilados, verifica-se que a grande maioria dos parâmetros avaliados apresentaram altas taxas de redução, conforme observado na Tabela 02.

Tabela 02: Caracterização físico-química e ecotoxicológica do efluente bruto e destilados

Parâmetro	Efluente bruto	E1 ¹	E2 ²	E3 ³
pH	7,98	9,08	9,08	8,99
Condutividade (µS/cm)	20.200,00	11.180,00	10.310,00	9.700,00
DQO (mg/L)	13.111,30	<5,00	<5,00	<5,00
Cor (mg Pt/L)	9.700,00	7,00	6,00	19,00
Turbidez (NTU)	151,00	1,42	1,86	1,55
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1.920,00	2.140,00	2.330,00	2.110,00
CL50;24h (%)	24,55	23,05	23,04	20,59

¹ Efluente tratado (destilado) referente ao primeiro ensaio de destilação

² Destilado referente ao segundo ensaio de destilação

³ Destilado referente ao terceiro ensaio de destilação

Com exceção da condutividade e da concentração de nitrogênio amoniacal, que por sua vez obtiveram uma redução média de aproximadamente 50% para a condutividade e um acréscimo médio de aproximadamente 14% na concentração de nitrogênio amoniacal (Figura 10), todos parâmetros físico-químicos analisados apresentaram redução média de aproximadamente 99% quando comparados ao efluente bruto.

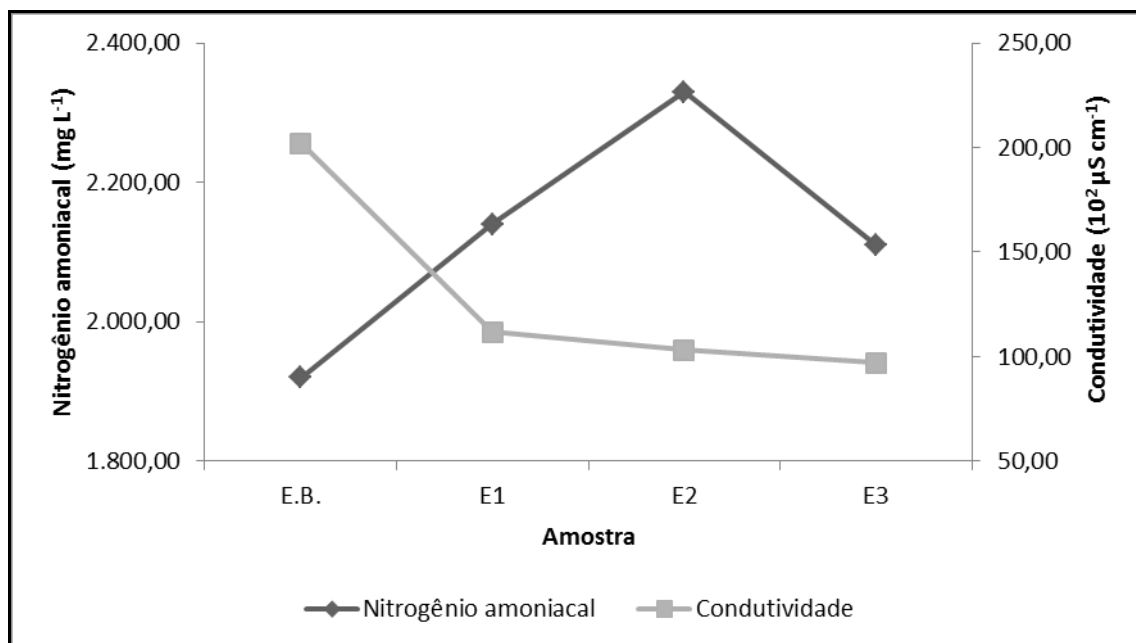


Figura 10: Variação da condutividade e da concentração de amônia durante os ensaios

No entanto, mesmo que expressivos índices de redução tenham sido obtidos para a maioria dos parâmetros, observa-se um aumento na ecotoxicidade dos destilados quando comparados ao efluente bruto (Figura 11). A CL_{50;24h} observada nos destilados é mais baixa que a do efluente bruto, ou seja, em uma mesma concentração os destilados são mais tóxicos que o efluente bruto.

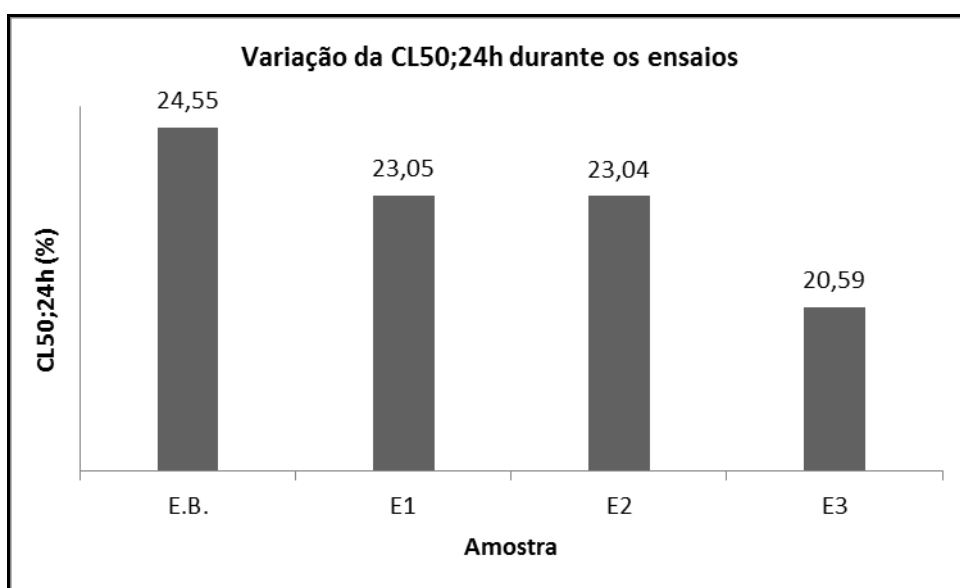


Figura 11: Aumento da toxicidade do efluente tratado em relação ao efluente bruto

Ressalta-se que não foi realizada a caracterização completa dos destilados,

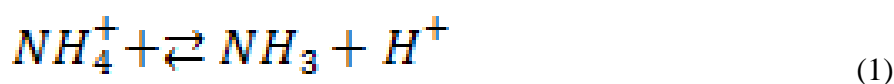
principalmente com relação às análises de metais, assim não é possível afirmar qual é a causa para o incremento na ecotoxicidade do efluente tratado.

Porém, observando-se que as concentrações de nitrogênio amoniacal aumentaram após o efluente passar pelo tratamento, é provável que este seja o motivo pelo qual houve o aumento nos índices de mortalidade (Tabela 03).

Tabela 03: Mortalidade média com base em uma duplicata para cada concentração da amostra

Concentrações da amostra (%)	Mortalidade média(%)			
	Efluente bruto	E1	E2	E3
100	100,00	100,00	100,00	100,00
50	100,00	96,88	100,00	100,00
25	25,00	45,00	43,75	65,00
12,5	22,22	12,37	11,21	16,67
6,25	6,25	11,11	10,80	6,25
Controle	0	0	0	0

Campos et al. (2010) afirma que o nitrogênio amoniacal é extremamente tóxico para a vida aquática. Quando em fase aquosa, o nitrogênio amoniacal encontra-se presente sob duas formas, que são a iônica (NH_4^+) e a livre (NH_3) (Equação 01), que é cerca de cem vezes mais tóxica que a forma ionizada.



De acordo com Metcalf e Eddy (2016), em níveis de pH maior que 7, o equilíbrio se desloca para a esquerda, enquanto que em níveis inferiores a 7 a forma iônica (NH_4^+) é predominante. É provável que este seja o motivo do aumento das faixas de pH do efluente tratado (destilado) em relação ao efluente bruto (Figura 12).

Durante os ensaios de destilação solar, é provável que a amônia livre presente no efluente bruto tenha sido volatilizada devido ao aumento da temperatura interna do módulo de destilação. Acredita-se que a NH_3 gasosa tenha condensado junto ao vapor d'água proveniente da destilação solar, permanecendo na forma aquosa junto aos destilados, causando o aumento nos níveis de pH. Também devido às altas temperaturas, é provável que o nitrogênio orgânico tenha sido convertido em nitrogênio amoniacal, justificando o aumento em suas concentrações.

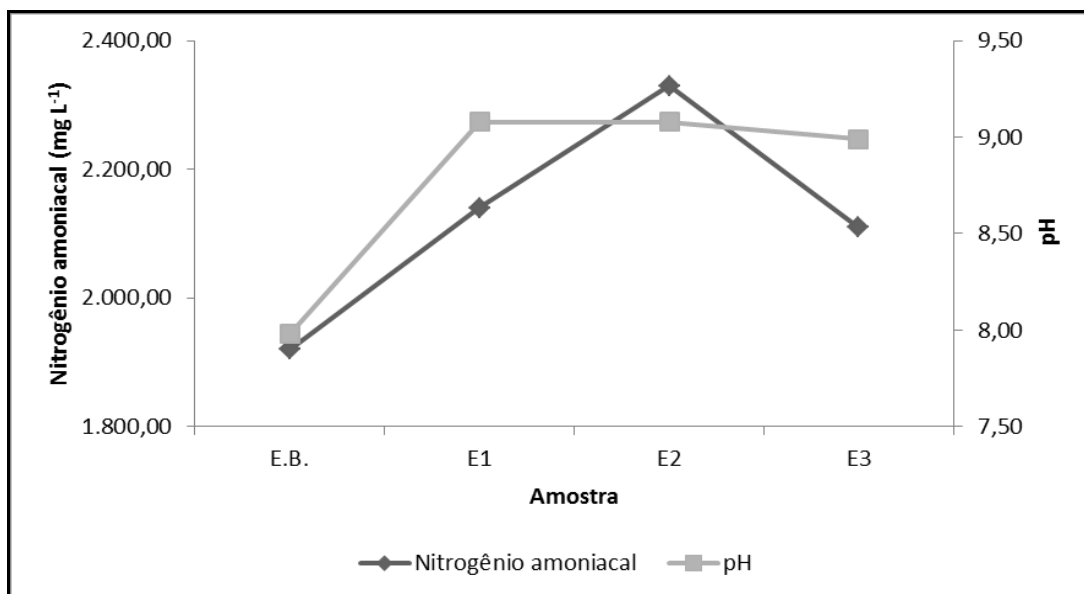


Figura 12: Relação entre a variação da concentração de amônia e pH observado durante o experimento

Campos et al. (2010) afirma que, por conter carga, a forma iônica confere maiores níveis de condutividade ao efluente. Também, a amônia livre (NH_3), quando em meio aquoso e sob condições adequadas de temperatura e pH (Figura 13), é passível de volatilização, enquanto que a forma ionizada não.

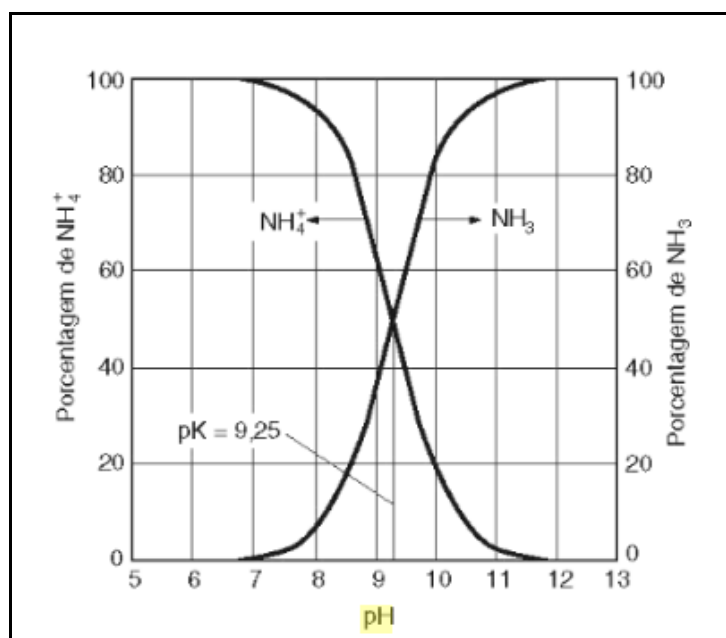


Figura 13: Distribuição da amônia livre (NH_3) e do íon amônio (NH_4^+) em função do pH a uma temperatura de 25°C
 Fonte: Metcalf e Eddy (2016)

Observando-se a Figura 13 verifica-se que o equilíbrio entre a forma iônica e a

forma livre do nitrogênio amoniacal é atingida na faixa de pH igual a 9,25 para uma temperatura de 25°C, ou seja, em faixas de pH superiores a 9,25 haverá a predominância da amônia livre.

Uma vez que a faixa de pH dos destilados ficou, em média, próxima a 9,00, o nitrogênio amoniacal ainda apresenta uma maior fração de NH_4^+ do que de NH_3 , o que justifica a alta condutividade observada nos destilados, que em média atingiu a faixa de 10.000,00 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

A concentração de amônia em ambientes aquáticos é também considerada como fator limitante para o crescimento e desenvolvimento dos peixes, sendo seus efeitos largamente estudados de maneira a promover melhores condições para a piscicultura.

De acordo com Randall & Tsui (2002), a forma livre da amônia é de natureza lipolífica, possuindo alta capacidade de difusão em membranas biológicas, enquanto que a forma ionizada caracteriza-se por conter moléculas maiores e mais carregadas, que não conseguem atravessar tão facilmente as membranas, tendo seu efeito tóxico reduzido, contribuindo ainda mais para a possibilidade de que o aumento no efeito tóxico do efluente tratado tenha sido causado pelas altas concentrações de amônia.

As temperaturas das faces externas do destilador ultrapassaram os 50° C nos ensaios E1 e E2 (Tabela 04), indicando ainda maiores temperaturas internas ao destilador e reforçando o processo de transferência da amônia livre.

Tabela 04: Temperaturas da face externa (Tfe) e temperaturas ambiente (Tamb) registradas durante os ensaios de destilação solar

Horário	Ensaio					
	E1		E2		E3	
	Tfe (°C)	Tamb (°C)	Tfe (°C)	Tamb (°C)	Tfe (°C)	Tamb (°C)
10:00	42	28	36	28	35	27
12:00	47,5	30	45,5	29	45	32
14:00	> 50	32	> 50	32	48	32
16:00	49	33	46	32	45	33
18:00	34	32	34	32	33,5	32

Resultados semelhantes foram obtidos por Sá et al. (2012), que ao utilizarem a destilação solar no tratamento de lixiviado de aterro sanitário obtiveram um

destilado com forte odor característico de nitrogênio amoniacal, sendo a concentração deste poluente aferida em níveis próximos a 1000 mg L^{-1} . Este fenômeno também é conhecido como amônia *stripping*, ou carregamento da amônia, que pode acontecer em condições adequadas de temperatura e pH e, ser intensificada por aeração mecânica, que por sua vez configura assunto para diversos trabalhos na área que investigam a remoção da amônia em sistemas biológicos aliando técnicas de aeração.

Brentano (2006) observou que o lixiviado tratado de aterro sanitário não apresentou toxicidade aguda durante os testes (Tabela 05). O lixiviado em questão era tratado por meio do uso de reator UASB seguido de um sistema de lagoas anaeróbia, facultativa, aerada e de polimento. O efluente final possuía valores máximos de pH e concentração de nitrogênio amoniacal de 7,52 e $4,29 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente, sendo que os demais parâmetros físico-químicos como a DQO, Turbidez, Dureza e entre outros encontravam-se dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

Maia et al. (2015) observaram que o lixiviado tratado de aterro sanitário apresentou CE50;48h de 26%. O tratamento recebido pelo lixiviado utilizado no estudo é composto por um sistema de lagoas anaeróbias seguido de um sistema de lodos ativados. A eficiência global de remoção de nitrogênio amoniacal do sistema atingiu 83%, sendo que o efluente tratado possuía uma concentração média de nitrogênio amoniacal de 240 mg L^{-1} .

Tabela 05: Caracterização ecotoxicológica de lixiviado de aterro sanitário (pós-tratamento) por diferentes autores.

Organismo	Parâmetro	Valor observado	Autor	Tipo de tratamento
Daphnia magna	CL50;48h	N.T.	Brentano (2006)	Físico-químico + biológico
Daphnia magna	CE50;48h	26,00%	Maia et al. (2015)	Biológico
Artemia Salina	CL50;24h	66,07%	Suzuki et al. (2013)	Biológico + Amonia <i>stripping</i>
Daphnia magna	CE50;48h	NT	Suzuki et al. (2013)	Biológico + Amonia <i>stripping</i>

*N.T. = não tóxico

Suzuki et al. (2013) realizou testes de ecotoxicidade em lixiviado de aterro sanitário após tratamento biológico seguido do processo de amônia *stripping*. Utilizando os organismos *Daphnia magna* e *Artemia Salina* (Tabela 05), verificou-se que o efluente não apresentou toxicidade para os testes com *Daphnia magna*, tendo apresentado um índice relativamente baixo de toxicidade para os testes com *Artemia salina*. De acordo com o autor, a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal no tratamento adotado foi de aproximadamente 98%, fator este que contribuiu significativamente para a redução da ecotoxicidade do efluente bruto, que antes de tratado possuía uma CE50;48h (*Daphnia magna*) de 8,35%.

O cálculo da CL50;24h foi realizado a partir da regressão logarítmica dos dados referentes à mortalidade dos organismos indicadores (Tabela 03), tendo sido construído o gráfico de dispersão para cada uma das análises, conforme observa-se na Figura 14.

A partir da equação gerada é possível determinar a concentração de amostra necessária para causar mortalidade a 50% dos organismos teste, ou seja, a CL50;24h.

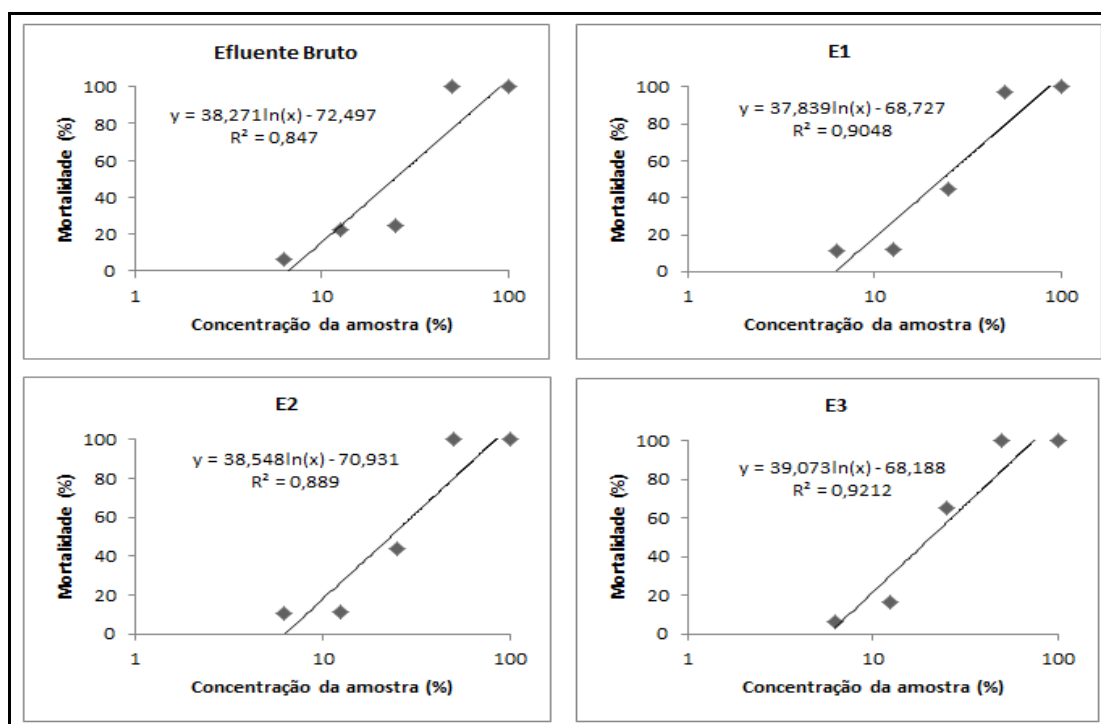


Figura 14: Gráficos da relação concentração da amostra e mortalidade em cada ensaio

6 CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado conclui-se que o tratamento de lixiviado de aterro sanitário por meio de destilação solar, nas condições apresentadas, não apresentou eficiência na redução da ecotoxicidade deste efluente, promovendo a intensificação do efeito tóxico devido à alta concentração de amônia no efluente tratado.

Ainda assim, foram obtidos resultados significativos na redução de parâmetros como a DQO, cor e turbidez, com índices de remoção de superiores a 98%.

Se utilizado em conjunto com outras técnicas de tratamento que objetivem remover a amônia presente no efluente tratado, a destilação solar pode vir a ser uma tecnologia muito eficaz no tratamento de lixiviado de pequenos aterros sanitários.

Neste caso, faz-se necessário também a análise de custos e de viabilidade operacional para que atenda às demandas, em questão de quantidade e também de qualidade, para se materialize sua implantação em condições reais.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a avaliação conjunta do tratamento por destilação solar aliado ao processo de amônia *stripping* como pós-tratamento, de maneira a se promover a remoção da amônia, realizando-se posterior caracterização ecotoxicológica e físico-química para verificar a influência da amônia na ecotoxicidade do efluente tratado bem como seus índices de redução.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. M. **Avaliação do Tratamento Combinado de Lixiviado de Aterro Sanitário e Esgoto Sanitário em Sistema de Lodos Ativado**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos. 281 p. 2012.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. Estados Unidos da América, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9897: Planejamento de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9898: Preservação e Técnicas de Amostragem de Efluentes Líquidos e Corpos Receptores**. Rio de Janeiro, 1987.

BEZERRA, M. A. S. **Desenvolvimento de um Destilador Solar para o Tratamento de Águas de Produção de Petróleo com Vistas a sua Utilização na Agricultura e Geração de Vapor**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 106 p. 2004.

BIDONE, R., F. **Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário Utilizando por um Sistema Composto por Filtros Anaeróbios Seguidos de Banhados Construídos: Estudo de Caso – Centra de Resíduos de Recreio, em Minas do Leão/RS**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos. 168 p. 2007.

BRASIL. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União nº 92 de 16/05/2011, p. 89. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

BRENTANO, D.M. **Desenvolvimento e aplicação do teste de toxicidade crônica com Daphnia magna: avaliação de efluentes tratados de um aterro sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 130p., 2006.

CAMPOS, D. C.; LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; RAMOS, P. C. A. **Stripping de amônia de Lixiviado de Aterro Sanitário em reatores de Fluxo Pistonado**. Revista Tecno-lógica, v. 14, n. 2, p. 52-60. Brasil, 2010.

CAMPOS, F.; PIVELI, R. P. **Redução da toxicidade aguda de lixiviado de aterro sanitário em co-tratamento com esgoto doméstico pelo processo integrado de lodo ativado com biofilme em leito móvel**. Ambiente e Água, v.11, n. 2 p.316-326. Taubaté, 2016.

CESAR, A.; SILVA, S. L. R.; SANTOS, A. R. **Testes de Toxicidade Aquática no Controle da Poluição.** Disponível em: <<http://www.unisanta.br/Download/Download?NomeDoArquivoOriginal=apostilaecotox.pdf>> . Acesso em: 25 out. 2015.

COSTA, C. G. **Destilação Solar:** aplicação no tratamento de efluente líquidos de laboratórios. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília. 106 p. 2008.

COSTA, C. R.; OLIVI, P.; BOTTA, C. M. R.; ESPINDOLA, E. L. G. **A Toxicidade em Ambientes Aquáticos: discussão e métodos de avaliação.** Química Nova, v.31, n. 7. São Paulo, 2008.

EL-FADEL, M.; BOU-ZEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. **Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content.** Waste Management, v.22, p.269-282, 2002

GOTJAVAN, A. Z., TISLER, T.; ZAGORC-KONCAN, J. **Comparison of Different Treatment Strategies for Industrial Landfill Leachate.** Journal of Hazardous Materials 162: 1446-1456. 2009.

KNIE, J. **Proteção Ambiental com Testes Ecotoxicológicos. Experiências com a Análise das Águas e dos Efluentes no Brasil.** Fundação do Meio Ambiente (FATMA). Santa Catarina, 14 p. 1998.

LANGE, L. C; ALVES, J. F.; AMARAL, M. C. S.; JÚNIOR, W. R. M. **Tratamento de Lixiviado de Aterros Sanitário por Processo Oxidativo Avançado Empregando Reagente de Fenton.** Eng. San. Ambient, v. 2, n. 2, p. 175-183. Rio de Janeiro, 2006.

MAGALHAES, D. P.; FERRÃO, A. S. F. **A Ecotoxicologia como Ferramenta no Biomonitoramento de Ecossistemas Aquáticos.** Oecologia Brasiliensis, v. 12 n. 3, p. 355-381. Brasil, 2008.

MAIA, I. S.; RESTREPO, J. J. B.; JUNIOR, A. B. C.; FRANCO, D. **Avaliação do tratamento biológico de lixiviado de aterro sanitário em escala real na Região Sul do Brasil.** Eng. Sanit. Ambient, v. 20, n. 4, p.665-675. Brasil, 2015.

MALUF, A. P. **Destiladores Solares no Brasil.** Monografia de Especialização. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais. 39 p. 2005.

METCALF, L; EDDY, H. P. **Tratamento de efluente e Recuperação de Recursos.** 5 ed. Bookman. Brasil, 2016.

MEYER, B. N.; FERRIGNI, N. R.; PUTNAM, J. E.; JACOBSEN, L.B.; NICHOLS, D.

E.; MCLAUGHLIN, J. L. **Brine Shrimp: A Convenient General Bioassay for Active Plant Constituents**. Journal of Medicinal Plant Research, v. 45, p. 31-34.1982.

MORAVIA, W. G. **Avaliação do Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário Através de Processo Oxidativo Avançado Conjugado com Sistema de Separação por Membranas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 262 p. 2010.

PARANÁ. **Resolução nº 081 de 16 de outubro de 2010**. Conselho Estadual de Meio Ambiente. Diário oficial nº 8326 de 19 de outubro de 2010. Disponível em: <<http://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=60027&indice=1&totalRegistros=5&anoSpan=2014&anoSelecionado=2010&mesSelecionado=0&isPaginado=true>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

PIMENTEL, M. F.; SILVA JÚNIOR, F. C. G.; SANTAELLA, S. T.; LOTUFO, L. V. C. **O Uso de Artemia sp. Como Organismo-Teste para Avaliação da Toxicidade das Águas Residuárias do Beneficiamento da Castanha de Caju Antes e Após Tratamento em Reator Biológico Experimental**. Ecotox Brasil, v.6, n. 1, p. 15-22. Fortaleza, 2011.

RAMOS, E. M. R. **Desenvolvimento de um Sistema Híbrido de Destilação Solar para Tratamento de Água Produzida**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 107 p. 2009.

RANDALL, D. J.; TSUI, T. K. N. **Ammonia toxicity in fish**. Marine Pollution Bulletin, n 45, p. 17-23. 2002.

REIS, B., G. **Avaliação da Eficiência de Processos Avançados na Remoção de Toxicidade de Lixiviado de Aterro Sanitário**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 172 p. 2014.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. Editora Cárita. 3º ed. Campinas-SP, 2014.

SÁ, L. D.; JUCÁ, J. F. T.; SOBRINHO, M. A. M. S. **Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário Usando Destilador Solar**. Revista Ambiente e Água, v. 7, n. 1, p. 1-14. Brasil, 2012.

SEGATO, L. M; SILVA, C. L. **Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.

SILVA, F. B. **Tratamento Combinado de Lixiviados de Aterros Sanitários**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 118 p. 2009.

SILVA, M. C. D. **Estudos Sobre Sistemas de Destilação Solar Direta Para Potabilização de Água.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 343 p. 2014.

SOARES, C. **Tratamento de Água Unifamiliar Através da Destilação Solar natural Utilizando Água Salgada, Salobra, Doce e Contaminada.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 110 p. 2004.


SUZUKI, L. Y.; BATISTA, A. L.; KURODA, E. K. **Estudos Ecotoxicológicos De Lixiviado De Aterro Sanitário Antes E Após Várias Etapas Do Tratamento.** Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 11, p. 202-217. Brasil, 2013.

TURETTA, L. **Estudo da Tratabilidade de Efluente de Reator Anaeróbio e Lixiviado de Aterro Sanitário Utilizando o Processo de Lodos Ativados.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos. 103 p. 2011.


ANEXO A – Laudos das análises químicas realizadas em laboratório particular

Laboratório		ANÁLISES DE QUALIDADE		www.a3q.com.br		
				Página 1 de 1 Emissão: 28-06-2016 22:36:54		
Dados do Solicitante						
Solicitante: FÁBIO LUIZ FRONZA			CNPJ/CPF:			
Endereço:			CEP: 85884000			
Cidade: MEDIANEIRA	Estado: PR	Responsável pela solicitação: FÁBIO LUIZ FRONZA		Telefone:		
Dados da Amostra						
Ordem Serviço: 9098436	Código da amostra: 8501FQ16					
Local de amostragem / Órgão expedidor: FÁBIO LUIZ FRONZA						
Descrição da amostra (Tipo): EFLUENTE				Lote/Labor: NI		
Fabricante: FÁBIO LUIZ FRONZA				Resp. coleta: SOLICITANTE		
Fabricação: NI	Validade: NI	Coleta: NI NI	Temp. Coleta: NI	Ponto de coleta: NI		
Remessa: NI	Recebimento: 07/05/2016 11:30	Etiqueta: 153795/154042	Temp. recebimento: 5,1°C	Condições da amostra: NORMAL - FRASCO		
Relatório de Ensaio Físico-Químico - 9.098.436-0						
Ensaio	Resultado	Unidade	Início	Fim	Referência	LQ
^{VI} CROMO HEXAVALENTE	<0,05	mg/L	07-05-2016	16-05-2016		0,05
^{VI} CROMO TRIVALENTE	0,470	mg/L	07-05-2016	16-05-2016		0,008
Abreviatura: NA = Não aplicado NI = Não informado LD = Limite de Detecção LQ = Limite de Quantificação NE = Não Especificado SVR = Sem Valor de Referência ND = Não Detectável VMP = Valor Máximo Permitido						
Metodologia(s): (1) APHA, AWWA, WEF - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22ª ed. 2012						
Informações adicionais: Todas as informações constam nos dados brutos das análises e estão a disposição do solicitante. O(s) resultado(s) desta(s) análise(s) tem significado restrito e se aplica(m) somente a(s) amostra(s) analisada(s). Este relatório de ensaio somente pode ser reproduzido por completo e sem nenhuma alteração. Procedimento de amostragem: Plano de amostragem é de responsabilidade do solicitante.						
Comentário(s): Nota: Opiniões e interpretações não fazem parte do escopo deste laboratório.						
 CRbio PR: 83724/07-D Lilian Patricia Ramos		 CRF PR: 25167 Lelaine E. R. Xavier		 CRF PR: 716 Alvaro Largura PhD		
		RT(s): Dr. Alvaro Largura, PhD CRF: 716 Gabriele P. Cinco CRBio: 45125-D Lelaine E. R. Xavier CRF: 25167		Natassia N. Bruschi CRBM: 20209 Lilian Patricia de Ramos CRBio - 83724/07D Alexandre S. dos Santos CRQ - 09401118		
Rua Uruguai, 533 - Alto Alegre - 85805-010 - Cascavel - PR Fone: 45 3333 6000 - Fax: 45 3333 6049 CNPJ: 05.642.544/0001-70						

Dados do Solicitante

Solicitante: FÁBIO LUIZ FRONZA			CNPJ/CPF:	
Endereço:			CEP: 85884000	
Cidade: MEDIANEIRA	Estado: PR	Responsável pela solicitação: FÁBIO LUIZ FRONZA	Telefone:	

Dados da Amostra

Ordem Serviço: 9098441	Código da amostra: 8502FQ16			
Local de amostragem / Órgão expedidor: FÁBIO LUIZ FRONZA				
Descrição da amostra (Tipo): EFLUENTE			Lotus/Lote: NI	
Fabricante: FÁBIO LUIZ FRONZA			Resp. coleta: SOLICITANTE	
Fabricação: NI	Validade: NI	Coleta: NI NI	Temp. Coleta: NI	Ponto de coleta: NI
Remessa: NI	Recabimento: 09/05/2016 08:15	Etiqueta: 153795	Temp. recebimento: 6,3°C	Condições da amostra: NORMAL - FRASCO

Relatório de Ensaio Físico-Químico - 9.098.441-0

Ensaio	Resultado	Unidade	Início	Fim	Referência	LQ
⁽¹⁾ MERCÚRIO TOTAL	<0,001	mg/L	09-05-2016	17-05-2016	Sem Valor de Referência	0,001

Abreviatura:

NA = Não aplicado | NI = Não informado | LD = Limite de Detecção | LQ = Limite de Quantificação | NE = Não Especificado | SVR = Sem Valor de Referência | ND = Não Detectável | VMP = Valor Máximo Permitido

Metodologia(s):

(1) APHA, AWWA, WEF - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22ª ed. 2012

Informações adicionais:

Todas as informações constam nos dados brutos das análises e estão a disposição do solicitante.
O(s) resultado(s) desta(s) análise(s) tem significado restrito e se aplica(m) somente a(s) amostra(s) analisada(s).
Este relatório de ensaio somente pode ser reproduzido por completo e sem nenhuma alteração.
Procedimento de amostragem: Plano de amostragem é de responsabilidade do solicitante.

Comentário(s):

Nota: Opiniões e interpretações não fazem parte do escopo deste laboratório.



Crbio PR: 83724/07-D
Lillian Patricia Ramos


CRF PR: 25167
Lellaine E. R. Xavier



CRF PR: 716
Alvaro Largura PhD



Dados do Solicitante

Solicitante: FÁBIO LUIZ FRONZA			CNPJ/CPF:	
Endereço:			CEP: 85884000	
Cidade: MEDIANEIRA	Estado: PR	Responsável pela solicitação: FÁBIO LUIZ FRONZA	Telefone:	

Dados da Amostra

Ordem Serviço: 9098442	Código da amostra: 8503FQ16			
Local de amostragem / Órgão expedidor: FÁBIO LUIZ FRONZA				
Descrição da amostra (Tipo): EFLUENTE		Lote/Lacr.: NI		
Fabricante: FÁBIO LUIZ FRONZA		Resp. coleta: SOLICITANTE		
Fabricação: NI	Validade: NI	Coleta: NI NI	Temp. Coleta: NI	Ponto de coleta: NI
Remessa: NI	Recabimento: 09/05/2016 08:15	Etiqueta: 154042	Temp. recebimento: 6,3°C	Condições da amostra: NORMAL - FRASCO

Relatório de Ensaio Físico-Químico - 9.098.442-0

Ensaio	Resultado	Unidade	Início	Fim	Referência	LQ
⁽¹⁾ ARSENIO TOTAL	<0,001	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,001
⁽¹⁾ CÁDMIO TOTAL	<0,001	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,001
⁽¹⁾ CHUMBO TOTAL	<0,011	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,011
⁽¹⁾ COBRE	<0,011	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,011
⁽¹⁾ FERRO TOTAL	4,5700	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,0036
⁽¹⁾ MANGANÊS TOTAL	<0,009	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,009
⁽¹⁾ NÍQUEL TOTAL	0,210	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,009
⁽¹⁾ ZINCO TOTAL	0,470	mg/L	09-05-2016	12-05-2016	Sem Valor de Referência	0,011

Abreviatura:

NA = Não aplicado | NI = Não informado | LD = Limite de Detecção | LQ = Limite de Quantificação | NE = Não Especificado | SVR = Sem Valor de Referência | ND = Não Detectável | VMP = Valor Máximo Permitido

Metodologia(s):

(1) APHA, AWWA, WEF - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22ª ed. 2012

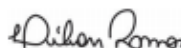
Informações adicionais:

Todas as informações constam nos dados brutos das análises e estão a disposição do solicitante.
O(s) resultado(s) desta(s) análise(s) tem significado restrito e se aplica(m) somente a(s) amostra(s) analisada(s).
Este relatório de ensaio somente pode ser reproduzido por completo e sem nenhuma alteração.
Procedimento de amostragem: Plano de amostragem é de responsabilidade do solicitante.

Comentário(s):

Nota: Opiniões e interpretações não fazem parte do escopo deste laboratório.





Crbio PR: 83724/07-D
Lilian Patricia Ramos



CRF PR: 25167
Lellaine E. R. Xavier



CRF PR: 716
Alvaro Largura PhD