



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
MESTRADO PROFISSIONAL

**ESTUDOS SOBRE ADSORÇÃO DE ÍONS METÁLICOS EM EFLUENTES
LÍQUIDOS PROVENIENTES DO ATERRO CONTROLADO DO AURÁ -
ANANINDEUA**

Admir Negrão Macêdo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

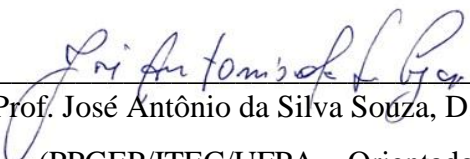
Belém
Outubro de 2017

**ESTUDOS SOBRE ADSORÇÃO DE ÍONS METÁLICOS EM EFLUENTES
LÍQUIDOS PROVENIENTES DO ATERRO CONTROLADO DO AURÁ -
ANANINDEUA**

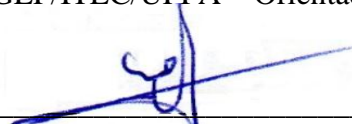
Admir Negrão Macêdo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



Prof. José Antônio da Silva Souza, D. Eng.
(PPGEP/ITEC/UFPA – Orientador)



Prof. Edinaldo José de Sousa Cunha, D. Eng.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Membro)



Profª. Augusta Paulain Ferreira Felipe, Dra.
(FEQ/ITEC/UFPA - Membro)



Prof. Marcelo José Raiol Souza, Dr.
(CCNT/UEPA – Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

OUTUBRO DE 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Macêdo, Admir Negrão, 1965-
Estudos sobre adsorção de íons metálicos em efluentes
líquidos provenientes do aterro controlado do Aurá -
Ananindeua. - 2017.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade
Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2017

1. Resíduos sólidos 2. Adsorção 3. Efluentes líquidos I.
Título

CDD 22.ed.660.284245

Aos que apoiaram, incentivaram e
contribuíram para a realização desse
projeto.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus que nos mostra que tudo é possível.

Aos meus pais e irmãos, por estarem sempre ao meu lado.

A minha família, esposa Luciane, filhos Ana Carolina, Felipe e Rita de cássia por estarem sempre me apoiando.

Ao Professor José Antônio da Silva Souza, pela paciência, orientação, direcionamento, incentivo e ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos professores, Emanuel Negrão Macedo e João Nazareno Nonato Quaresma que sempre se fizeram presentes, contribuindo de todas as formas, na construção deste projeto.

A Msc. Lianne Maria Magalhães Dias, que não mediu esforços desde a campanha de coleta de efluentes, ensaios laboratoriais e sempre de prontidão para qualquer auxílio, desde já meus sinceros agradecimentos.

Aos colegas de campanha, Msc. Maria Vitória Roma da Silva, Graduando Hugo Thiago Nascimento Carvalho que também caminharam comigo desde o início da campanha.

Ao Msc. Bruno Marques Viegas que compartilhou seus conhecimentos, contribuindo muito para melhorar o trabalho, meu muito obrigado.

A todos que de alguma forma envidaram esforços no sentido de acrescentar e ajudar, por menor ou simples que fosse, obrigado.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M.Eng.)

**ESTUDOS SOBRE ADSORÇÃO DE ÍONS METÁLICOS EM EFLUENTES
LÍQUIDOS PROVENIENTES DO ATERRO CONTROLADO DO AURÁ -
ANANINDEUA**

Admir Negrão Macêdo

Outubro/2017

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Engenharia de Processos

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos estipulou agosto de 2014 como o prazo final para que as prefeituras de todo o país providenciassem o encerramento das atividades dos lixões e implantassem os aterros sanitários. A disposição final do lixo da Região Metropolitana de Belém teve início em 1987, com a criação de um lixão em Ananindeua, denominado de lixão do Aurá. Após anos de funcionamento foi desativado o lixão passou a receber tratamento de aterro controlado. A produção e a disposição final dos resíduos sólidos urbanos ainda representa um grande risco para o meio ambiente e para a saúde pública, devido principalmente à formação de lixiviado e sua infiltração. Dessa maneira, o objeto do trabalho visa estudar a ocorrência de contaminação, caracterizar os íons de metais pesados nos efluentes líquidos que alteram a composição do solo sob a base do aterro e na margem da lagoa do antigo depósito de resíduos sólidos urbanos da Região Metropolitana de Belém – PA, determinar a concentração dos metais pesados cobre (Cu), cádmio(Cd), cromo (Cr), ferro (Fe), alumínio(Al), manganês(Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco(Zn) nas amostras do chorume e solo do aterro do Aurá, estudar o processo de adsorção do íon Cu^{+2} sobre o material zeolítico, avaliar a capacidade de remoção do íon Cu^{+2} utilizando zeólita em coluna de leito fixo, avaliar se os níveis de metais pesados determinados no líquido percolado estão em conformidade com os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA N°430/2011.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M.Eng.)

**STUDIES ON ION ADSORPTION METAL IN LIQUID EFFLUENTS FROM
LANDFILL CONTROLLED AURA-ANANINDEUA.**

Admir Negrão Macêdo

October/2017

Advisor: José Antônio da Silva Souza

Research Area: Process Engineering

Law No. 12,305 of August 2, 2010, which instituted the National Solid Waste Policy stipulated August 2014 as the deadline for municipalities throughout the country to provide for the closure of dump activities and to implement landfills. The final garbage disposal of the Metropolitan Region of Belém began in 1987, with the creation of a dump in Ananindeua, called the Aurá dump. After years of operation was deactivated the landfill began to receive treatment of controlled landfill. The production and final disposal of municipal solid waste still poses a great risk to the environment and to public health, mainly due to the formation of leachate and its infiltration. In this way, the objective of this work is to study the occurrence of contamination, to characterize the heavy metal ions in the liquid effluents that alter the composition of the soil under the landfill base and in the lagoon margin of the former urban solid waste deposit of the Metropolitan Region of (Cb), chromium (Cr), iron (Fe), aluminum (Al), manganese (Mn), nickel (Ni), lead (Pb) and (Zn) in the leachate and soil samples from the Aurá landfill, to study the adsorption process of the Cu^{+2} ion on the zeolitic material, to evaluate the Cu^{+2} ion removal capacity using fixed bed column zeolite, to evaluate if the levels of heavy metals determined in the percolated liquid are in conformity with the standards of discharge of effluents established by the Resolution of the National Council of the Environment - CONAMA N°430 / 2011.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - ASPECTOS GERAIS E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVO GERAL.....	2
1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 - ATERRO SANITÁRIO.....	3
2.1.1 - Geologia.....	5
2.1.2 - Hidrologia.....	6
2.1.3 - Vegetação.....	6
2.1.4 - Formação do Chorume.....	6
2.2 - METAIS PESADOS.....	8
2.3 - INERTIZAÇÃO.....	10
2.4 - RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	12
2.4.1 - Classificação dos Resíduos Sólidos.....	13
2.4.1.1 - Classe I - Resíduos Perigosos.....	13
2.4.1.2 - Classe II - Resíduos Não Perigosos.....	14
2.4.2 - Classificação quanto à fonte geradora.....	14
2.5 - POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH).....	15
2.6 - ZEÓLITAS.....	15
2.6.1 - Produção de Zeólitas.....	17
2.6.2 - Aplicação de zeólitas.....	20
2.7 - TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO.....	21
2.7 - 1Tratamento de lixiviado utilizando adsorção.....	22
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	25
3.2 - MONITORAMENTO DE COLETAS.....	27
3.3 - PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	27
3.4 - COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	29
3.4.1 - Coleta e preparo das amostras do lixiviado.....	29
3.4.2 - Coleta e preparo das amostras do solo.....	30
3.5 - ANÁLISE DOS ÍONS METÁLICOS.....	31

3.5.1 - Análise do Cu, Cr, Mn, Ni, Fe, Al e Zn no lixiviado.....	31
3.5.2 - Análise do Cu, Cr, Mn, Ni, Fe, Al e Zn no solo.....	32
3.6 - ADSORÇÃO.....	32
3.6.1 - Materiais.....	32
3.6.1.1 - Adsorvente.....	32
3.6.1.2 - Areia.....	33
3.6.1.3 - Adsorvato.....	33
3.6.2 - Reagentes analíticos.....	33
3.6.3 - Ensaios de adsorção em coluna de leito fixo	33
3.6.3.1 - Determinação da porosidade do leito.....	36
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 - RESULTADOS DAS ANÁLISES METAIS NO LIXIVIADO E SOLO DO ATERRO.....	37
4.2 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA REALIZADA NA ZEÓLITA SINTETIZADA.....	38
4.3 - ANÁLISE DE ADSORÇÃO.....	38
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
5.1 - CONCLUSÕES GERAIS.....	40
5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Sistema dinâmico de síntese hidrotermal para obtenção de zeólitas.....	18
Figura 2.2	Esquema de síntese de zeólita a partir da cinza de carvão mineral	19
Figura 2.3	Análise da microscopia de varredura (MEV) da zeólita sintetizada ZSH	20
Figura 3.1	Mapa de Localização do Aterro do Aurá	25
Figura 3.2	Caminhos percorridos pelos resíduos.....	26
Figura 3.3	Croqui de acesso aos pontos de amostragem.....	28
Figura 3.4	Amostras do lixiviado coletado na base do aterro.....	29
Figura 3.5	Amostras do lixiviado coletado a margem da lagoa de deposição.....	29
Figura 3.6	Aspecto das amostras de chorume.....	30
Figura 3.7	Amostras do solo coletado na base do aterro.....	30
Figura 3.8	Amostras do solo coletado a margem da lagoa de deposição.....	31
Figura 3.9	Esquema da coluna de leito fixo.....	34
Figura 3.10	Sistema operacional de adsorção em coluna de leito fixo.....	35
Figura 4.1	Análise granulométrica da zeólita ZSH.....	38
Figura 4.2	Adsorção de Cu^{2+} em zeólita ZSH.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Íons que podem ser encontrados no chorume e possíveis fontes.....	7
Tabela 2.2	Condições experimentais adotadas na síntese de zeólita	18
Tabela 3.1	Pontos de Amostragem, localização e coordenadas geográficas.....	27
Tabela 3.2	Condições adotadas no experimento em que foi analisada a capacidade de adsorção de Cu^{2+}	35
Tabela 4.1	Limites máximos comparados com a média das amostras de líquidos percolados.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ABRELPE	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS
AC	AMOSTRA CERTIFICADA
Al	ALUMÍNIO
Ar	ARGÔNIO
As	ARSÊNIO
ASE	ÁREA SUPERFICIAL POR UNIDADE DE MASSA
B	BORO
Br	BROMO
C	CARBONO
Ca	CÁLCIO
CC	CHORUME CÉLULA
Cd	CÁDMIO
CETESB	COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO
CIN	CINZA VOLANTE <i>IN NATURA</i>
Cl	CORO
CL	CHORUME LAGOA
Co	COBALTO
COT	CARBONO ORGÂNICO TOTAL
CONAMA	CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE
CONDER DA BAHIA	COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO
COPAM	CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL
Cr	CROMO
CTC	CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS
Cu	COBRE
CVC	CINZA VOLANTE CALCINADA
DBO	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO
D _L	DIÂMETRO INTERNO DA COLUNA
D _P	DIÂMETRO MÉDIO DA PARTÍCULA DE ZEÓLITA
DQO	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

Fe	FERRO
Ge	GERMÂNIO
H _C	ALTURA TOTAL DA COLUNA
Hg	MERCÚRIO
H _L	ALTURA DO LEITO
I	IODO
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
ICP-OES	ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA COM PLASMA INDUZIDO
IEC	INSTITUTO EVANDO CHAGAS
IPT	INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
K	POTÁSSIO
m _{areia}	MASSA DE AREIA
Mg	MAGNÉSIO
Mn	MANGANÊS
Mo	MOLIBDÊNIO
mzso	MASSA DE ZEÓLITA
N	NITROGÊNIO
Na	SÓDIO
NBR	NORMA BRASILEIRA
Ni	NÍQUEL
P	FÓSFORO
Pb	CHUMBO
pH	POTENCIAL HIDROGENIÔNICO
PNSB	PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO
PROSAB	PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO
PVC	POLICLORETO DE POLIVINILA
Q	VAZÃO DE SAÍDA DO SISTEMA
Sb	ANTIMÔNIO
SC	SOLO CÉLULA
Se	SELÊNIO
Si	SILÍCIO
SISNAMA	SISTEMA NACIONAL DE MEIO AMBIENTE
SL	SOLO LAGOA

Sn	ESTANHO
SNVS	SISTEMA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA
SO	LATITUDE
Ti	TITÂNIO
U	URÂNIO
UFPA	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
V_L	VOLUME DO LEITO
V_v	VOLUME DE VAZIOS DO LEITO
WO	LONGITUDE
Zn	ZINCO
ZSH	ZEÓLITA SINTÉTICA PELO MÉTODO HIDROTÉRMICO

Símbolos Gregos

ε	POROSIDADE DO LEITO
---------------	---------------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS E MOTIVAÇÃO

No Brasil, assim como em outras nações do mundo, o processo de urbanização promove inúmeros impactos ambientais sobre a paisagem urbana. As consequências ambientais decorrentes do inadequado tratamento dos resíduos sólidos urbanos impactando diretamente na qualidade do ar, das águas superficiais e subterrâneas e dos solos, através da contaminação pelos gases e lixiviados (chorume) gerados da decomposição desses resíduos, além dos metais pesados contidos no lixiviado que causam sérios problemas de saúde. Estima-se que a produção anual de lixo no Brasil esteja em torno de 44 milhões de toneladas, sendo que 63,6% dos municípios ainda utilizam lixões para dispor seus resíduos, 18,4% depositam em aterros controlados, e apenas 13,8% em aterros sanitários. No Estado do Pará são gerados 6.813 t/dia de resíduos sólidos (ABRELPE, 2010).

SOARES (2004) afirma que os entraves do gerenciamento dos resíduos sólidos, principalmente nos países em desenvolvimento, tornou-se complexo devido à quantidade e diversidade dos resíduos, à explosão das áreas urbanas, a restrição dos recursos financeiros públicos e as limitações tanto de energia quanto de recursos naturais. Segundo IPT (2000), o chorume produzido em aterros sanitários apresenta altas concentrações de substâncias orgânicas e inorgânicas conferindo-lhe grande potencial poluente, pois tende escoar superficialmente até chegar em rios, lagos, nascentes ou infiltrar no solo e atingir o lençol freático, contaminando as águas subterrâneas.

Dentro desse contexto a motivação passa pela busca de novas tecnologias ambientais como determinação da concentração dos metais pesados, estudar o processo de adsorção do íon Cu^{+2} sobre o material zeolítico, avaliar a capacidade de remoção do íon Cu^{+2} utilizando zeólita, material abundante, barato e que pode ser sintetizada, avaliar se os níveis de metais pesados determinados no líquido percolado estão em conformidade com os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pela legislação vigente e através dos resultados obtidos incentivar outras pesquisas bibliográficas,

aplicar novas metodologias que minimizem os impactos ambientais provocados pelos líquidos lixiviados.

1.2 OBJETIVO GERAL

Estudar a ocorrência de contaminação e a caracterização dos íons de metais pesados nos efluentes líquidos que alteram a composição do solo sob a base do aterro e na margem da lagoa do antigo depósito de resíduos sólidos urbanos da Região Metropolitana de Belém – PA.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a concentração dos metais pesados: cobre (Cu), cádmio(Cd), cromo (Cr), ferro (Fe), alumínio(Al), manganês(Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco(Zn) nas amostras do chorume e solo do aterro do Aurá;
- Estudar o processo de adsorção do íon Cu^{+2} sobre o material zeolítico;
- Avaliar a capacidade de remoção do íon Cu^{+2} utilizando zeólita em coluna de leito fixo;
- Avaliar se os níveis de metais pesados determinados no líquido percolado estão em conformidade com os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA Nº430/2011.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ATERRO SANITÁRIO

O crescimento desordenado das cidades, especialmente das grandes metrópoles, tem provocado uma série de problemas socioeconômicos e ambientais. Atualmente são várias as atividades humanas que causam impactos ambientais, dentre elas pode-se destacar a disposição inadequada dos resíduos sólidos que provocam alterações na qualidade do solo, do ar e dos corpos aquáticos, além de representar um risco para a saúde pública. A responsabilidade pela disposição final dos resíduos sólidos urbanos é das prefeituras e os resíduos sólidos industriais, de serviços de saúde e agrícola é do próprio gerador. No entanto, a grande maioria dos resíduos sólidos gerados no Brasil é disposta em lixões causando sérios problemas ambientais (GUIMARÃES, 2009).

A disposição final ou destinação final dos resíduos sólidos urbanos consiste em um problema sério que as prefeituras têm dificuldade de equacionar, pois mesmo com o tratamento ou aproveitamento dos resíduos, ainda existem os resíduos remanescentes. Na maioria dos municípios brasileiros, a administração se limita a recolher o resíduo domiciliar de forma nem sempre regular, depositando-os em locais afastados da vista da população, sem maiores cuidados sanitários (GUIMARÃES, 2009).

No Brasil, os locais mais utilizados para disposição final de resíduos sólidos urbanos são os lixões, os aterros controlados e os aterros sanitários, sendo que somente o último caso é a alternativa adequada para descarte final, uma vez que é fundamentado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, segundo a lei nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010.

Os aterros podem ser classificados conforme a forma de disposição do lixo (LIMA, 1995):

- Aterros comuns (lixões): o lixo é apenas descartado no solo, a céu aberto, sem qualquer tratamento; são também denominados lixões, lixeiras, vazadouros, etc. Este método de disposição é o mais prejudicial devido aos enormes problemas ambientais, sanitários e sociais que causam, como a poluição do

solo, poluição do ar e da água, além da atração e proliferação de vetores de doenças;

- Aterros controlados: nesses lugares não há a impermeabilização do solo e não é prevista a implantação de sistema de captação de gases e efluentes. O lixo depositado recebe uma cobertura diária de material inerte, o que não resolve os problemas de poluição. O aterro controlado pode apresentar vários problemas que estão associados aos lixões, apesar de minimizar os impactos ambientais;
- Aterros sanitários: são aqueles executados segundo os critérios e normas de segurança ambiental, legislativa e técnica atendendo os padrões de segurança preestabelecidos.

Os aterros controlados e os lixões possuem um potencial elevado de poluição do solo e da água, pois as chuvas que lixiviam através do lixo dissolvem e carregam todos os tipos de contaminantes orgânicos e inorgânicos que podem causar contaminação do lençol freático se não forem inertizadas pelo solo através dos processos de filtragem, adsorção, biodegradação e precipitação química (AZEVEDO e DALMOLIN, 2004). No entanto, há muita dificuldade em quantificar a presença de metais pesados em lixões e aterros controlados, devido à inexistência de controle dos materiais depositados nesses locais.

Um aterro sanitário pode ser definido como um equipamento urbano de infraestrutura, integrante de um sistema de engenharia sanitária e ambiental, destinado à disposição final e tratamento dos resíduos sólidos, de forma a permitir que os mesmos sejam confinados sob o solo, e que os líquidos e gases resultantes das reações químicas dos processos de decomposição sejam devolvidos ao meio ambiente com o mínimo de impacto (GUIMARÃES, 2009).

A situação da disposição final dos resíduos sólidos no Brasil tem melhorado, mas a minoria dos municípios dispõe de técnicas adequadas. Na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada pelo IBGE em 2000, observou-se que os vazadouros a céu aberto constituíram o destino final dos resíduos sólidos em 72,3% dos municípios brasileiros. Já na PNSB realizada em 2008, observou-se que 50,8% 15 dos municípios brasileiros encaminharam seus resíduos sólidos para lixões (IBGE, 2008). A região Sudeste apresenta, segundo a pesquisa, um dos menores percentuais (18,7%) de uso desses vazadouros como forma de disposição final de resíduos. Paralelamente, registrou-se expansão na adoção dos aterros sanitários como uma das soluções

adequadas para a gestão de resíduos sólidos urbanos que passou de 17,3% dos municípios brasileiros, em 2000, para 27,7%, em 2008.

No Estado de Minas Gerais, até 2002, cerca de 96% dos municípios depositavam seus resíduos sólidos em lixões (BRUSCHI, 2011). A partir de 2002, a situação começou a mudar com a implementação de uma política de eliminação dos lixões e convocação ao licenciamento ambiental de sistemas tecnicamente adequados de tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos, por meio da Deliberação Normativa nº. 52/2001 do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). Em dezembro de 2011, o Programa Minas sem Lixões contabilizou 278 municípios, 32,6% do total do estado, que ainda utilizavam lixões para disposição de resíduos sólidos urbanos, redução significativa quando comparado ao percentual de 2002 (FEAM, 2011).

A predominância de formas inadequadas de destinação final pode ser explicada por vários fatores, tais como: falta de capacitação técnico-administrativa, orçamento insuficiente, pouca conscientização da população quanto aos problemas ambientais ou mesmo falta de estrutura organizacional das instituições públicas (CASTILHOS JR. *et al.*, 2003). O maior desafio está em encontrar soluções para os municípios de pequeno porte, devido à menor disponibilidade de recursos financeiros, recursos humanos especializados e critérios técnicos, econômicos e sociais para tratar a questão dos resíduos sólidos urbanos.

Algumas alternativas mais simples de aterros sanitários vêm sendo propostas com o objetivo de reverter o cenário nos municípios de pequeno porte, tais como: Aterros Sanitários em Valas, pela CETESB (1997) em São Paulo, Aterros Sanitários Simplificados, pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia – CONDER (2002) e Aterros Sustentáveis para Municípios de Pequeno Porte, pelo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB (CASTILHOS JR. *et al.*, 2003), desenvolvido em nível nacional.

2.1.1 Geologia

Predominam na área do estudo, solos do tipo Latossolo Amarelo, seguido do Concrecionário Laterítico, Glay pouco húmico, Podzol Hidromórfico e Areias Quartzosas segundo (VIEIRA e SANTOS, 1987), estudo recentes mostram que a sub-superfície local, até a profundidade média de 20m, é essencialmente argilosa (BAHIA, 2003). Nos poços encontraram-se argilas de coloração marrom esverdeada, argilas

variadas com, concreções ferruginosas (mais abundantes) e cinza esbranquiçadas com tons avermelhados. Intercaladas nas argilas ocorrem pacotes de areia média a fina, quase sempre de espessuras inferiores a 2 milímetros (BAHIA, 2003).

2.1.2 Hidrologia

Os principais aquíferos da Região Metropolitana de Belém são constituídos pelos sedimentos clásticos arenosos do Quaternário e do Grupo Barreiras, que se estendem em geral até profundidades inferiores a 50 m. Abaixo de 50 m encontram-se aquíferos importantes representados por sedimentos arenosos e calcíferos da Formação Pirabas (MATTA, 2002).

2.1.3 Vegetação

Segundo DIAS (1991) na circunvizinhança, predominam vegetação autóctone ou seja própria do lugar, onde as espécies mais adaptadas às condições edafoclimáticas da área resistem ao processo de decomposição da matéria orgânica, uma grande extensão de floresta equatorial e mata ciliar composta de vegetação de igarapés preservadas.

2.1.4 Formação do Chorume

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1984) define chorume como sendo um líquido de coloração preta, mal cheiroso e de elevado potencial poluidor, produzido pela decomposição da matéria orgânica contida no lixo. Segundo SISINO (2002), ao percolar através da massa de lixo, a água carrega compostos orgânicos e inorgânicos e produtos em decomposição, formando um líquido altamente poluente e de complexa composição, ao qual chamamos de chorume.

As condições básicas para que ocorra a formação do chorume incluem a manutenção dos processos anaeróbios, teores elevados de matéria orgânica e umidade, sendo que a principal fonte precursora para formação do chorume é a água da chuva que através da infiltração, há uma migração de compostos químicos presentes na massa de lixo aterrada, que gradativamente aumenta o volume percolado, diluindo a concentração de vários íons contaminantes conforme afirma (SISINO, 2002). A Tabela 2.1 apresenta

os íons que podem ser carregados pelo líquido que percola a massa de lixo, bem como suas possíveis fontes.

Tabela 2.1: Íons que podem ser encontrados no chorume e possíveis fontes.

Íons	Fontes
Na, K, Ca, Mg	Material orgânico, entulhos de construção, cascas de ovos.
P, N, C	Material orgânico.
Al	Latas descartáveis, cosméticos, embalagens laminadas em geral.
Cu, Fe, Sn	Material eletrônico, latas, tampas de garrafas.
Hg, Mn	Pilhas comuns e alcalinas, lâmpadas fluorescentes.
Ni, Cd, Pb	Baterias recarregáveis (celular, telefone sem fio, automóveis).
As, Sb, Cr	Embalagens de tintas, vernizes, solventes orgânicos.
Cl, Br, Ar	Tubos de PVC, negativos de filmes e raios X

Fonte: RODRIGUES (2004).

De uma forma geral, o processo de decomposição do lixo se dá em três fases: a aeróbia, a acetogênica e, por último, a metanogênica. Na primeira fase há uma grande liberação de calor e o chorume produzido nesta fase apresenta elevadas concentrações de sais de alta solubilidade, inclusive alguns contendo metais. Os microrganismos aeróbios, ou seja, aqueles que utilizam oxigênio na decomposição de matéria orgânica, dão início à decomposição do lixo. Esta fase é relativamente curta, durando em média um mês, uma vez que a quantidade limitada de oxigênio presente no meio é consumida rapidamente (IPT, 2000).

Após a diminuição da quantidade de oxigênio, começam a predominar microrganismos anaeróbios facultativos, ou seja, aqueles que preferencialmente não usam o oxigênio no metabolismo. Esses microrganismos são chamados de bactérias acetogênicas. Essas bactérias convertem o material orgânico particulado em dissolvido a partir do processo de hidrólise. Em seguida dá-se o processo fermentativo. Durante esta segunda fase, que pode perdurar por alguns anos, é produzido compostos orgânicos simples e de alta solubilidade, principalmente ácidos graxos voláteis, como o ácido

acético, e também amônia. Estes ácidos se misturam com a água percolada pela massa de lixo, fazendo com que o pH do chorume caia consideravelmente, para valores que podem variar de 4 a 6. Nesta fase, em geral a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é alta, com valores superiores a 10 g/L (IPT, 2000). Na terceira e última fase, os compostos orgânicos formados na fase acetogênica começam a ser consumidos por microrganismos estritamente anaeróbios, denominados arqueasmetanogênicas. Com o consumo dos ácidos voláteis, o valor do pH volta a subir, favorecendo o aparecimento desses organismos que se desenvolvem preferencialmente em meios com pH próximo ao neutro (7,0).

Na última fase, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) tende a diminuir. Estando o pH próximo do neutro, reduz-se a solubilidade de compostos inorgânicos, diminuindo a condutividade elétrica do chorume. Nessa condição, a divisão do valor da DBO pelo valor de demanda química de oxigênio (DQO) resulta em valores mais baixos, o que significa menor capacidade de biodegradação do chorume. Isso se deve ao fato de que, nessas condições, há um acúmulo no chorume de ácidos fúlvicos e húmicos, de difícil degradação biológica, os quais contribuem para a coloração escura do chorume. Embora esta divisão em fases facilite bastante o entendimento do processo de estabilização do lixo e seus impactos sobre a composição do chorume, bem como sobre composição das emissões gasosas, na prática, durante a vida ativa de um aterro, elas podem ocorrer concomitantemente, uma vez que sempre há aterramento de resíduos sólidos novos, causando uma grande variabilidade na idade do material disposto (MEIRA, 2003).

2.2 METAIS PESADOS

Metais pesados são elementos químicos pertencentes ao grupo de transição da tabela periódica, cujas formas iônicas possuem densidade atômica elevada (maior que $6,0 \text{ g.cm}^{-3}$) ou massa atômica maior que 20, além de outros semi-metais e não-metais (MATOS *et al.*, 1996). São exemplos de metais pesados os elementos cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb), ferro (Fe), manganês (Mn), cobalto (Co) e zinco (Zn). Esse termo (metais pesados) engloba alguns elementos considerados elementos tóxicos ou não essenciais, como o Pb, Cd, Hg, As, Ti, e U, bem como elementos essenciais ou micronutrientes, que são aqueles requeridos pela maioria dos seres vivos em pequenas concentrações, mas que podem se tornar tóxicos em elevadas

concentrações, como é o caso de Cu, Mn, Fe e Zn para plantas e animais, Co, Cr, Se e I para os animais e B, Mo, e Ni exclusivamente para as plantas (ALLOWAY, 1990).

De acordo com a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n° 357 de 2005 – art. 34, o limite máximo que poderá ser lançado direta ou indiretamente nos corpos de água é de 1,0 mg L⁻¹ para o cobre, 1,0 mg L⁻¹ para o Manganês, 15,0 mg L⁻¹ para o Ferro e 5 mg L⁻¹ para o Zinco. Com isso, todo efluente contaminado com esses metais deverá ser tratado, a fim de satisfazer tal exigência.

Os metais pesados ocorrem naturalmente nos solos, geralmente em baixas concentrações, como resultado do intemperismo e outros processos pedogenéticos que atuam nos fragmentos de rocha, que são o material de origem dos solos.

Os metais pesados são classificados também como elementos traço, pois ocorrem em concentrações menores que 1% nas rochas que compõe a crosta terrestre. Eles são considerados impurezas, uma vez que substituem isomorficamente macro elementos na estrutura cristalina de muitos minerais primários (ALLOWAY, 1990). Esses elementos são amplamente utilizados no desenvolvimento da sociedade, sendo utilizados como matéria-prima em diversas indústrias de bens de consumo e em fertilizantes agrícolas. Todavia, a contaminação do solo e da água decorrente do excesso de metais pesados é cada vez mais frequente e preocupante por causa do seu impacto negativo no ecossistema (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2001).

Vale considerar aqui que contaminação refere-se a um aumento da concentração de determinado elemento em relação às concentrações naturais, enquanto poluição refere-se ao aumento dessas concentrações em níveis que afetam os componentes bióticos do ecossistema, comprometendo sua funcionalidade e sustentabilidade (ALLOWAY, 1990).

A presença de metais pesados nos solos pode ter origem natural – depende do material de origem e do grau de intemperização do solo – ou antropogênica, que é a principal razão do aumento na concentração de metais pesados em solos agrícolas (ABREU *et al.*, 2002). Os metais pesados presentes naturalmente nos solos originam-se do intemperismo da rocha matriz, sobretudo aquelas ricas em sulfetos, óxidos, silicatos, fosfatos e carbonatos.

As concentrações desses metais podem ser acentuadas pela ação antrópica, como a utilização no solo de substratos, orgânicos e/ou inorgânicos com altas concentrações de metais pesados. Estes resíduos são geralmente provenientes de atividades urbanas, industriais e agrícolas (DUARTE e PASCOAL, 2000).

Os métodos usualmente utilizados na remoção de metais pesados na maioria das vezes apresentam baixa eficiência, geração de grande volume de lodo químico e/ou custo elevado quando os metais estão em baixas concentrações (BARROS, 2009). Portanto, faz-se necessário a procura por métodos alternativos de baixo custo e alta eficiência. E é neste âmbito que surge a utilização de zeólitas sintéticas, para adsorver metais pesados.

2.3 INERTIZAÇÃO

O solo atua como um “filtro” da água que contém materiais dissolvidos e constituintes coloidais, principalmente materiais orgânicos que podem ser mineralizados durante a passagem através do solo. Essa “capacidade de filtração” pode ser usada intencionalmente em sistemas de deposição de lixo (HAAN e ZWERMANN, 1978). O tema central do fenômeno de poluição do solo é o conhecimento dos processos de acumulação e transporte no solo, principalmente para compostos perigosos. A mobilidade e acumulação desses elementos são governadas principalmente por interações do elemento de interesse com a fase sólida. As interações que ocorrem podem ser, conforme HAAN e ZWERMANN (1978), do tipo:

- a) Adsorção: induzida pela atração eletrostática entre compostos carregados e constituintes do solo com carga contrária;
- b) Repulsão eletrostática: quando a carga eletrostática do composto e dos constituintes do solo são iguais. É geralmente o caso certos ânions com as cargas predominantemente negativas dos constituintes do solo. A atração e a repulsão são processos que ocorrem simultaneamente no solo;
- c) Quimiossorção: esse mecanismo de interação é difícil de ser distinguido da adsorção eletrostática, exceto pelo valor da energia de adsorção, que é maior na quimiossorção. Uma das consequências dessa elevada energia de adsorção é que os elementos ligados por quimiossorção são pouco disponíveis;
- d) Precipitação e dissolução: essas reações dependem do equilíbrio químico no solo. Eles podem ser os principais mecanismos a governar a mobilidade de certos metais pesados e fósforo;
- e) Decomposição: muitos compostos presentes no solo estão sujeitos a reações de decomposição química e microbiana. A migração dos contaminantes através do meio poroso ocorre segundo mecanismos de transporte associados a processos

físico-químicos e bioquímicos. Os processos físico-químicos envolvem os fenômenos de advecção (quando a substância é transportada devido ao fluxo do fluido no qual ela está dissolvida ou em suspensão coloidal, movendo-se na direção das linhas de fluxo), difusão (movimento de solutos dissolvidos na água em decorrência de um gradiente químico) e dispersão, enquanto os químicos estão relacionados às interações que podem ocorrer entre solo e poluente em função das reações bioquímicas e físico-químicas a que essas substâncias estão sujeitas, quando em contato com o solo.

O solo possui uma grande capacidade de retenção de metais pesados, porém, se essa capacidade for ultrapassada, os metais em disponibilidade no meio penetram na cadeia alimentar dos organismos vivos ou são lixiviados, colocando em risco a qualidade do sistema de água subterrânea. A retenção desses metais no solo pode se dar de diferentes formas, já que os argilominerais possuem sítios negativos onde os metais são adsorvidos por forças eletrostáticas (MATOS *et al.*, 1996).

A capacidade de inertização depende de características intrínsecas de cada solo, sendo necessária ampla análise para determinar se um determinado solo apresenta características que o habilite a servir como depósito de resíduos. Atributos dos solos como pH, textura e composição mineral (teor e tipos de argilas, teor de óxidos de ferro, alumínio e manganês), teor de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC), potencial de oxirredução, composição da solução do solo e a temperatura do ambiente (ALLOWAY, 1990; OLIVEIRA, 1998), bem como das propriedades de cada metal (SIMÃO e SIQUEIRA, 2001) influenciam na capacidade de inertização, que são dependentes de reações químicas e de processos microbiológicos.

O solo pode inativar íons e compostos por reações de adsorção, complexação ou precipitação. Os micro-organismos do solo auxiliam nesses processos, pois são capazes de decompor os mais diversos materiais orgânicos, desdobrando-os em compostos menos tóxicos ou atóxicos (COSTA *et al.*, 2004) Solos de textura argilosa, por exemplo, apresentam uma maior capacidade de reter os metais provenientes da decomposição do lixo. Isso porque eles apresentam uma maior Área Superficial por Unidade de Massa (ASE), Quanto menor o tamanho maior será a ASE, e em geral maior CTC, onde os metais pesados podem se ligar. Essa ligação geralmente acontece por complexo de esfera interna, ou seja, é uma ligação muito forte, capaz de imobilizar o metal, diminuindo muito os riscos de lixiviação desses elementos, o que, a princípio,

evitaria a contaminação do lençol freático e a contaminação dos solos próximos ao local.

Assim, o perfil natural de um solo pode servir como meio atenuante de contaminantes que, através de processos físicos, químicos e biológicos de interação solo-polvente, alteram a concentração da solução. Segundo SANTOS (1996), acreditava-se que, no passado, os percolados do lixo eram completamente purificados pelo solo e, desta forma, não havia a preocupação com relação à contaminação das águas subterrâneas. Em geral, os solos com alto teor de argila apresentam baixa permeabilidade, e por isso são frequentemente utilizados como barreiras naturais e artificiais em sítios de disposição de resíduos para limitar o escape dos contaminantes, tanto para o lençol freático quanto para o solo. Assim, é de suma importância conhecer as características físicas e físico-químicas dos solos argilosos para compreender melhor sua função na impermeabilização e retenção/atenuação de lixiviados gerados pelos lixões.

2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos podem ser definidos como:

(...) resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

De maneira que o lixo é designado como todo e qualquer resíduo que resulta das mais variadas atividades diárias do homem e sociedade. Apresenta uma composição bastante variada, podendo conter agentes biológicos patogênicos ou resíduos químicos tóxicos, os quais podem alcançar o homem, por via direta ou indireta prejudicando a saúde.

Com o aumento da urbanização e a crescente industrialização, houve um aumento expressivo na quantidade de lixo gerada, principalmente nas áreas urbanas. Estima-se que cada brasileiro produza 1,3 Kg de lixo por dia, o que representa a geração diária, no Brasil, de aproximadamente 230 mil toneladas. A disposição final deste lixo varia conforme a região onde é coletado, mas em média, cerca de 71% é destinado a aterros (sanitários ou controlados) e 26% a lixões a céu aberto (IBGE, 2003).

Os resíduos sólidos apresentam grande diversidade e se originam das mais variadas atividades humanas e ambientes urbanos. Podemos citar como exemplo os restos de frutas, legumes e alimentos em geral, plásticos, metais diversos, vidros, papéis, materiais provenientes da limpeza de locais públicos, materiais cerâmicos, ossos, couro, trapos, animais mortos e restos de construção civil, para citar os mais importantes.

2.4.1 Classificação dos Resíduos Sólidos

A ABNT, em sua norma NBR 10004 (2004), classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. Os resíduos são divididos em:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos;
- b) Resíduos Classe II – Não perigosos, subdivididos em Resíduos Classe II A – Não inertes e Resíduos Classe II B – Inertes.

2.4.1.1 Classe I - Resíduos Perigosos

Aqueles que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, apresentam periculosidade, ou inflamabilidade, ou corrosividade, ou reatividade, ou toxicidade, ou, ainda, patogenicidade, podendo representar:

- a) Risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- b) Risco ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

São exemplos: resíduos de atividades industriais contendo solventes, metais pesados e outras substâncias nocivas.

2.4.1.2 Classe II - Resíduos Não Perigosos

a) II A - Não inertes: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou resíduos classe II B – Inertes e podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Exemplos: resíduos domiciliares, comerciais e públicos constituídos de restos de alimentos, papel, plástico, madeira, metais e outros.

b) II B – INERTES: quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007 (2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Exemplos: resíduos de construção civil, cacos de vidro, entre outros.

2.4.2 Classificação quanto à fonte geradora

Segundo a Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, têm-se a seguinte classificação quanto à origem:

- a) Resíduos domiciliares: aqueles provenientes de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados em atividades comerciais, excetuados os de limpeza urbana, os de serviços públicos de saneamento, os de serviços de saúde, os resíduos da construção civil e os resíduos de serviços de transporte;
- d) Resíduos dos serviços públicos de saneamento: os gerados nessas atividades, excetuados os resíduos domiciliares e de limpeza urbana;
- e) Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- f) Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema

Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);

- g) Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- h) Resíduos agrossilvopastoris: os originários das atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- i) Resíduos de serviços de transportes: os gerados em portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- j) Resíduos de mineração: os provenientes de atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

2.5 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

O pH representa a concentração de íons H^+ indicando a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. De acordo com CETESB (2007) a influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies. O efeito indireto do pH está na condição de contribuir para a precipitação ou para a solubilização de elementos químicos tóxicos como metais pesados. Desta forma, as restrições de faixas de pH são estabelecidas para as diversas classes de águas naturais e são regulamentadas pela Resolução nº 430/2011 do CONAMA que estabelece como condição de qualidade de água o pH compreendido na faixa de 5,0 a 9,0.

A medida do pH é um dos testes mais importantes para a caracterização físico-química da água (líquidos percolados), interferindo diretamente na estabilidade e solubilidade de metais. O pH pode ser determinado de várias formas, utilizando indicadores e papéis indicadores, colorimetricamente ou potenciometricamente. O método mais utilizado é o potenciométrico, através de um instrumento chamado pHmetro.

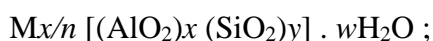
2.6 ZEÓLITAS

O termo zeólita foi utilizado inicialmente para designar uma família de minerais naturais que apresentavam como propriedade particular o intercâmbio de íons

e a dessorção reversível de água. Esta última propriedade deu origem ao nome genérico de zeólita, o qual deriva das palavras gregas: zeo - que ferve, e lithos - pedra, ou seja, pedra que ferve (GIANNETO, 1990).

Zeólitas são definidas como aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos ou alcalinos terrosos, em particular, sódio, potássio, magnésio, cálcio, estrôncio e bário, estruturados em redes cristalinas tridimensionais, compostas de tetraedros do tipo TO_4 ($T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co, etc.$) unidos nos vértices através de átomo de oxigênio (LUZ, 1995).

As zeólitas podem ser representadas pela fórmula empírica abaixo:



Onde n representa a valência do cátion M , w é o número de moléculas de água, $x+y$ é o número total de tetraedros SiO_4 e AlO_4 por célula unitária e y/x é a razão atômica Si/Al , que pode variar de 1 até infinito (DIAS *et al.*, 2015; BRECK, 1984).

A estrutura das zeólitas apresentam um conjunto de cavidades que podem ser ocupadas por íons e/ou moléculas de água, que, por apresentarem liberdade de movimento nos canais intersticiais, permitem a troca iônica e a hidratação reversível do material. Estas cavidades conferem a zeólita uma estrutura constituída de poros com diâmetros que podem variar de 3 a 10\AA (AGUIAR, 2002). Esse tipo de estrutura permite a transferência de matéria entre os espaços intracristalinos, no entanto, essa transferência é limitada pelo diâmetro dos poros das zeólitas. Dessa forma, só podem ingressar ou sair do espaço intracristalino aquelas moléculas cujas dimensões são inferiores a um certo valor crítico, que varia para cada tipo de zeólita (LUZ, 1995).

Segundo BRECK (1974), as zeólitas apresentam ocorrência natural geralmente encontradas em depósitos associados com a ativação alcalina de rochas vulcânicas, porém podem ser sintetizadas sob certas condições de temperatura, pressão, atividade das espécies iônicas e pressão parcial da água que são fatores determinantes na formação das diferentes espécies de zeólitas.

As zeólitas naturais são geralmente encontradas em depósitos associados com a ativação alcalina de rochas vulcânicas (IZIDORO, 2008). Existem na natureza aproximadamente 40 tipos de zeólitas (International Zeolite Association, 2012). As zeólitas naturais mais comuns são analcima, chabazita, clinoptilolita, erionita, faujasita, ferrierita, heulandita, laumontita, mordenita e phillipsita (MUMPTON, 1999).

2.6.1 Produção de Zeólitas

As zeólitas sintéticas são geralmente produzidas por tratamento alcalino de sílica e alumina a partir de materiais sintéticos, naturais ou residuais (SHOUMKOVA, 2011).

As cinzas volantes são fontes de alumínio e silício, os quais são os principais elementos na composição das zeólitas, devido à isso, ao alto conteúdo de fases reativas das cinzas e a granulometria fina das mesmas, são consideradas matéria-prima excelente para a síntese de zeólitas (QUEROL *et al.*, 2002).

Os processos de obtenção das zeólitas sintéticas se dividem em dois tipos: por via úmida (hidrotérmico) e por via seca (gel seco). Comercialmente existe um único processo de fabricação de zeólitas, o processo hidrotérmico (FERRET, 2004). O processo hidrogel e a conversão de materiais sólidos naturais e/ou resíduos são variantes do mesmo processo hidrotérmico. Enquanto o primeiro utiliza soluções supersaturadas de aluminatos e silicatos (géis), o segundo usa como fontes de Si e Al aluminossilicatos amorfos sólidos (caulim, cinzas de combustão, etc.) (PAPROCKI, 2009).

Atualmente, as zeólitas sintéticas são usadas mais frequentemente do que as zeólitas naturais devido à pureza dos produtos cristalinos e à uniformidade do tamanho das partículas (RÍOS *et al.*, 2012).

Desde o estudo de síntese da zeólita a partir de cinzas de carvão publicado em 1985 por Höller e Wirsching, muitas pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas, com o objetivo de melhorar e otimizar os métodos de zeolitização utilizando cinzas leves de carvão (RÍOS *et al.*, 2012; SHOUMKOVA, 2011)

Diversos estudos indicam que as cinzas de carvão mineral, compostas principalmente de fases como quartzo (SiO_2), mulita ($\text{Al}_{4+2x}\text{Si}_{2-2x}\text{O}_{10-x}$), hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), podem produzir zeólitas a partir de tratamento hidrotérmico alcalino (DIAS *et al.*, 2015; IZIDORO, 2013; NASCIMENTO *et al.*, 2012; ROCHA JUNIOR *et al.*, 2012).

As vantagens do uso da zeólita obtida a partir das cinzas de carvão mineral são: (1) é sintetizada a partir de resíduo abundante; (2) o reagente usado na síntese pode ser reaproveitado; (3) a zeólita pode ser regenerada com NaCl (cloreto de sódio); (4) o metal pode ser recuperado; (5) as resinas poliméricas trocadoras de íons disponíveis comercialmente são relativamente caras; (6) a estrutura da zeólita confere seletividade por tamanho, forma e carga; (7) estabilidade térmica e resistência à radiação (FUNGARO e SILVA, 2008).

A síntese hidrotermal para obtenção de material zeolítico, a partir de cinza volante calcinada, utilizada no processo de adsorção deste trabalho foi realizada em um sistema fechado conforme ilustra a Figura 2.1.

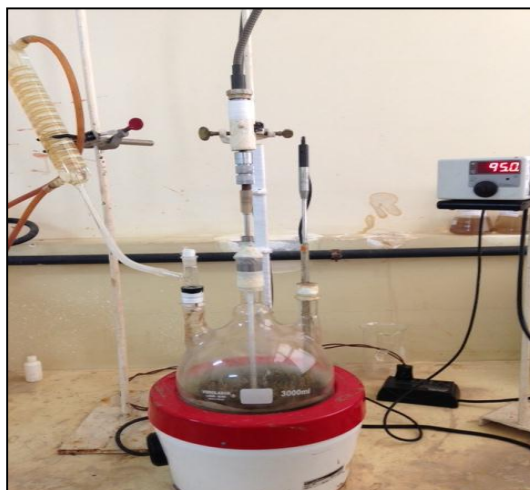


Figura 2.1 – Sistema dinâmico de síntese hidrotermal para obtenção de zeólitas.

O sistema consiste de um balão de vidro com três vias, com capacidade de 3000 mL e aquecimento através de uma manta. Na via central está acoplado o agitador mecânico e nas vias laterais o condensador de refluxo e o termopar para controle da temperatura, a qual foi ficou na faixa de 95 °C.

As condições de síntese estabelecidas por DIAS *et al.* (2015) estão apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Condições experimentais adotadas na síntese de zeólita.

PARÂMETROS EXPERIMENTAIS	
Massa de cinza volante calcinada	150 g
Concentração de NaOH	3,6M
Concentração de Na ₂ CO ₃	1,28 M
Massa de Na ₂ SiO ₃	160g
Volume de água	1200 mL
Razão Líquido/Sólido	8
Temperatura de síntese	95°C
Tempo de reação	8h

Decorrido o tempo de síntese o produto sólido formado foi filtrado, lavado até que o material apresentasse um pH abaixo de 9 e, em seguida, seco em estufa a 95°C por 12 horas.

O fluxograma desse procedimento pode ser observado na Figura 2.2.

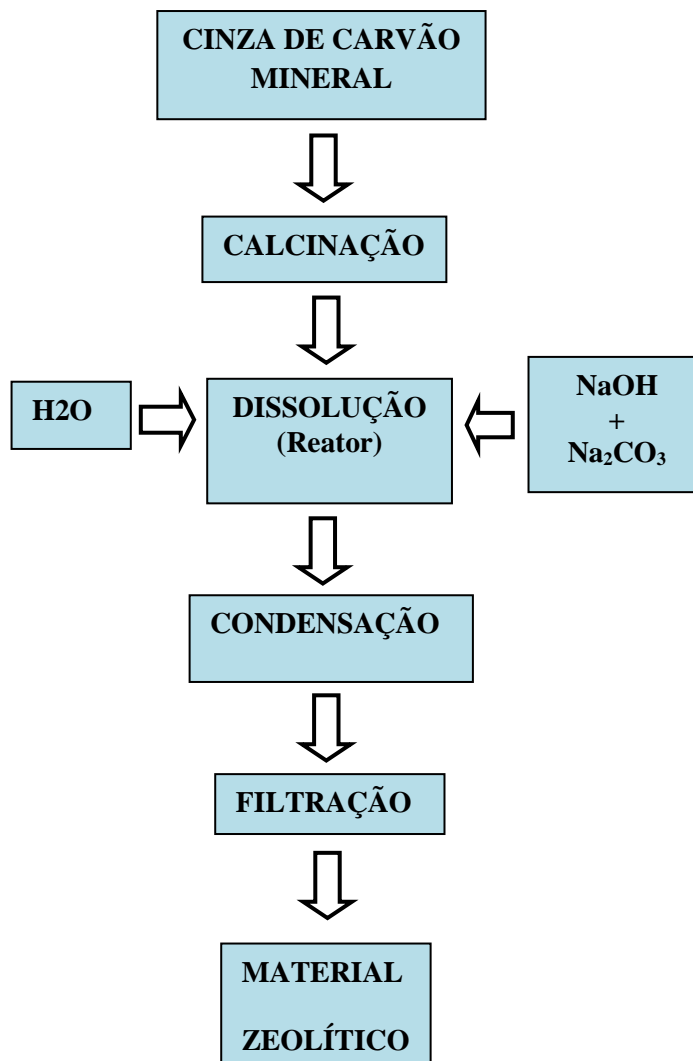


Figura 2.2 - Esquema da síntese da zeólita a partir da cinza de carvão mineral

A análise da Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da síntese ZSH está apresentada na Figura 2.3. As imagens confirmam a presença de hidroxissodalita e aglomerados de partículas pequenas porque os cristais das zeólitas formadas precipitam sobre as partículas das cinzas de carvão que não reagiram no processo hidrotérmico.

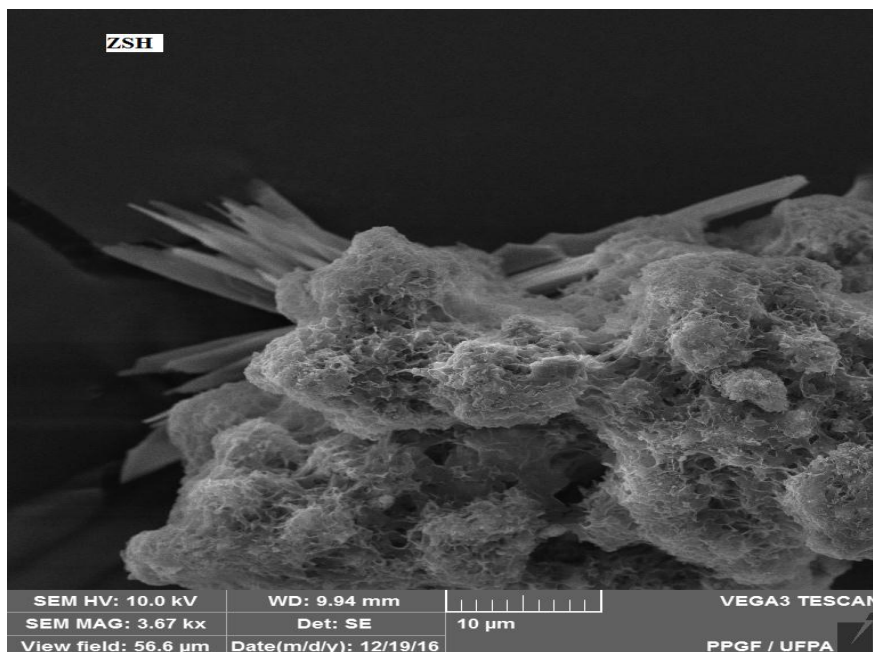


Figura 2.3 - Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV) da síntese ZSH.

A dissolução das cinzas ocorre com a elevação da temperatura (20 - 120°C), e a concentração de OH⁻ interfere significativamente na velocidade da reação. Na etapa de condensação ocorre a reação entre os íons aluminato e silicato com a formação de gel aluminossilicato (hidrogel). A quantidade de íons Si₄ e Al₃ dissolvidos diminuem rapidamente de acordo com o progresso da etapa de condensação. Em seguida, o hidrogel é transformado em cristal de zeólita. Neste estágio, a quantidade de Na⁺ na reação alcalina controla a velocidade de cristalização. O rendimento e a pureza da zeólita obtida são influenciados pela composição da matéria prima e reagentes e condições de reação (SHOUMKOVA, 2011; MURAYAMA *et al.*, 2002).

Segundo estudo realizado por (UMANÃ, 2002), os parâmetros mais importantes nos processos de zeolitização por processo hidrotérmico são a composição química da cinza, concentração e tipo do agente de ativação, a relação líquido/sólido, temperatura, tempo de reação e intensidade de agitação. Em diferentes condições experimentais é possível sintetizar, a partir de um tipo de cinzas, mais de 15 tipos de zeólita (RÍOS *et al.*, 2009).

2.6.2 Aplicação de zeólitas

A aplicação de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas volantes de carvão, que são um dos resíduos de maior geração no Brasil em termos de volume, contribui de

forma significativa com a redução dos impactos ambientais provocados por usinas termelétricas a carvão, podendo ser utilizados em diversos setores, já que este processo apresenta baixo custo e também é ambientalmente viável. Algumas aplicações são: remoção de íons metálicos em água e em efluentes de galvanoplastia (FUNGARO e SILVA, 2002; FUNGARO e IZIDORO, 2004b; FUNGARO, 2004), adsorção de íons metálicos tóxicos de águas residuárias poluídas (PIMRAKSA *et al.*, 2010; QUEROL *et al.*, 2002; SINGER e BERGAUT, 1996; SRINIVASAN & GRUTZECK, 1999; KOLOUSEK *et al.*, 1993; ENDRES, 2001; GOBBI *et al.*, 2004; QUEROL *et al.*, 2001; FUNGARO e IZIDORO, 2006a; IZIDORO e FUNGARO, 2007; FUNGARO e IZIDORO, 2008; IZIDORO, 2008; BÖER, 2013), tratamento de solos (FERRET, 2004), tratamento de drenagem ácida de mina (MORENO *et al.*, 2001; FUNGARO e IZIDORO, 2006b; PAPROCKI, 2009), como peneiras moleculares para purificação de gás (Querol *et al.*, 2001), remoção de corantes em solução aquosa (BRUNO, 2008; FUNGARO e BRUNO, 2009a; FUNGARO e BRUNO 2009b; FUNGARO *et al.*, 2009a; FUNGARO *et al.*, 2009b; CARVALHO, 2010; CARVALHO *et al.*, 2010; FUNGARO *et al.*, 2010; MAGDALENA, 2010; FERREIRA, 2011; CARVALHO *et al.*, 2011; CUNICO e al., 2011; FUNGARO *et al.*, 2011; MAGDALENA *et al.*, 2012; BERTOLINI *et al.*, 2013).

A utilização das zeólitas obtida a partir de cinza do carvão mineral como adsorvente apresenta algumas vantagens: (1) é sintetizada a partir de resíduo abundante e poluente; (2) o reagente usado na síntese é de baixo custo e pode ser reaproveitado; (3) a zeólita pode ser regenerada; (4) a estrutura confere seletividade de moléculas por tamanho (5) apresenta estabilidade térmica e resistência a radiação (FUNGARO e IZIDORO, 2008).

2.7 TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

O crescimento populacional e o consumismo das civilizações contemporâneas fazem com que o volume de resíduos gerados seja cada vez mais crescente, fazendo com que surja cada vez mais a necessidade de se dar um destino correto a esses resíduos (KEMERICH *et al.*, 2014). A degradação física, química e biológica da matéria orgânica presente dos resíduos sólidos gera um subproduto altamente poluidor, denominado lixiviado. Várias técnicas de tratamento aplicadas a esse efluente vêm

sendo investigada a fim de adequá-lo ao lançamento no corpo receptor sem causar prejuízos ao meio ambiente (KAWAHIGASHI *et al.*, 2014).

Lixiviados de aterros sanitários apresentam altas concentrações de nitrogênio amoniacal e matéria orgânica, além de outros poluentes, que não permitem seu descarte no meio ambiente, sem um prévio tratamento. Lixiviados de aterros sanitários mais antigos, com matéria orgânica mais estabilizada, apresentam grande potencial poluidor, principalmente devido à presença de substâncias recalcitrantes que, usualmente, não são removidas através de tratamento biológico, necessitando, portanto, da aplicação de um pós-tratamento (AMARAL, 2009).

2.7.1 Tratamento de lixiviado utilizando adsorção

A adsorção tem se destacado como um processo de separação principal por ser um processo com alta seletividade em nível molecular. O processo de adsorção pode ser dividido em duas principais categorias: adsorção física e adsorção química. A adsorção física é causada por forças de interação molecular que envolve dipolos permanentes e dipolos induzidos. Já a adsorção química envolve a acumulação de substâncias em uma superfície ou interface de grande área específica, bem como a afinidade física entre o adsorbato e a superfície do material adsorvente ou seja a adsorção química é um fenômeno de interface onde as moléculas de uma fase fluida, gasosa ou líquida, tendem a aderir a uma superfície sólida.

Devido a suas propriedades, tais como grande área superficial, estrutura microporosa, alta capacidade de adsorção e superfície reativa, o uso de Carvão Ativado Granular (CAG) ou em Pó (CAP) tem sido largamente empregado nos processos de tratamento de lixiviados de aterro sanitário, sobretudo na remoção de compostos não biodegradáveis. Basicamente, o processo de adsorção consiste na transferência de compostos presentes na fase líquida para a superfície reativa, seguida da vinculação desse material nos “vazios” do carvão ativado devido a interações físicas e/ou químicas (TAE, 2011).

Alguns metais pesados são substâncias altamente tóxicas e não são compatíveis com a maioria dos tratamentos biológicos de efluentes existentes. Os metais podem ser solubilizados pela água, podendo gerar danos à saúde em função da quantidade ingerida pela sua toxicidade, ou de seu potencial carcinogênico, mutagênico ou teratogênico. Outro problema relacionado aos metais é que, mesmo em concentrações diminutas, eles

podem gerar danos importantes aos organismos aquáticos e ao homem. Em muitos casos tais concentrações são inferiores à capacidade de detecção desses metais em laboratório (CONCIANI, 2011). Dessa forma, efluentes contendo esses metais não devem ser descartados na rede pública, para tratamento em conjunto com o esgoto doméstico. Muitos trabalhos tem sido realizados com o intuito de se avaliar a possibilidade de adsorção desses metais pesados presentes no chorume ou lixiviado/percolado de aterros sanitários.

KAWAHIGASHI (2002) estudou a aplicabilidade do pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário por adsorção em carvão ativado. A autora avaliou a adsorção do lixiviado em carvão granular. O lixiviado foi tratado previamente por *stripping* de amônia seguido de tratamento biológico por lodos ativados e pós-tratamento por coagulação-floculação-sedimentação com a utilização do cloreto férrico como coagulante químico. Os parâmetros monitorados para avaliar a eficiência dos tratamento foram cor aparente, cor verdadeira, DQO, COT e cloretos. Segundo a Revista TAE (2011), o mecanismo de coagulação desestabiliza as partículas coloidais por meio da ação de produtos químicos chamados de Coagulantes, sobretudo, sais de Ferro e Alumínio. Uma vez desestabilizadas as partículas, segue-se a etapa de floculação, onde haverá o incremento do tamanho dos flocos os quais, em seguida, poderão ser separados da fase líquida por meio da sedimentação. Em geral, o emprego dessa técnica envolve ajustes de pH e diferentes adições dos coagulantes. De um modo geral, os dados obtidos na literatura apontam para o emprego de processos de Coagulação/Floculação em lixiviados de aterros sanitários novos apenas como forma de pré-tratamento, em função dos baixos índices de remoção quando comparados com outras técnicas. Por outro lado, é possível obter-se excelentes índices de remoção de compostos refratários no tratamento de lixiviados estabilizados.

LISBOA e MORAIS (2013) estudaram a capacidade de adsorção de contaminantes presentes no chorume através da adsorção por xisto retornado, a fim de remover os componentes presentes no chorume. Os ensaios de adsorção foram realizados em colunas de leito fixo e leito fluidizado com diferentes dosagens de xisto retornado, 30, 80 e 130 mg L⁻¹. Os parâmetros avaliados foram nitrito, nitrato, fosfato, nitrogênio amoniacal, DQO, zinco, níquel, cromo, chumbo e ferro.

MAURÍCIO (2014) estudou o tratamento de lixiviado de aterro sanitário utilizando processo de separação por membranas e zeólita natural. Os resultados mostraram que o sistema de microfiltração seguido de nanofiltração foi eficiente para a

remoção de matéria orgânica, com remoção média de 73% de DQO, 84% de COT e 93% de Abs 254 nm. Após o processo de separação por membrana, o lixiviado permaneceu ainda com elevada concentração de nitrogênio amoniacal (em média, 972 mg/L) sendo recolhido e submetido ao tratamento com zeólita natural em estado pulverizado. Após o processo de adsorção em zeólita, foi possível remover 70% do nitrogênio amoniacal.

SILVA *et al.* (2014) avaliou a eficiência do pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário por coagulação, filtração ascendente em pedregulho seguido de adsorção em carvão ativado granular.

CASTILHOS JÚNIOR (2010) estudou o tratamento de lixiviado de aterro sanitário por filtração direta ascendente, seguida de filtração em coluna de carvão ativado. Foi obtido uma eficiência de redução de amônia de 33,25% nos valores de concentração no tratamento por filtração e de 85,37% na coluna de carvão ativado. Em relação às variáveis DQO e DBO5, que representaram a matéria orgânica presente, ocorreu também uma remoção significativa, atingindo valores de 65,1 e 45,3%, respectivamente.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é feita uma descrição geral da área de estudo, dos pontos de coleta dos materiais, preparação das amostras, análise química dos íons metálicos, bem como é descrito os equipamentos e a metodologia experimental adotada na síntese de zeólitas a partir de cinza de carvão e nos ensaios dinâmicos de adsorção realizados em coluna de leito fixo.

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no Aterro Aurá, situado na região metropolitana de Belém, localizado no quadrante entre os paralelos 10° 10' S e 10 30' S e os meridianos 480° 25' W e 480° 35' W, fazendo limite ao sul com o rio Guamá, ao norte com a baía do Marajó até o extremo oriental da ilha do Mosqueiro e a oeste com as baías do Marajó, Guajará e Santo Antônio, conforme ilustra a Figura 3.1.

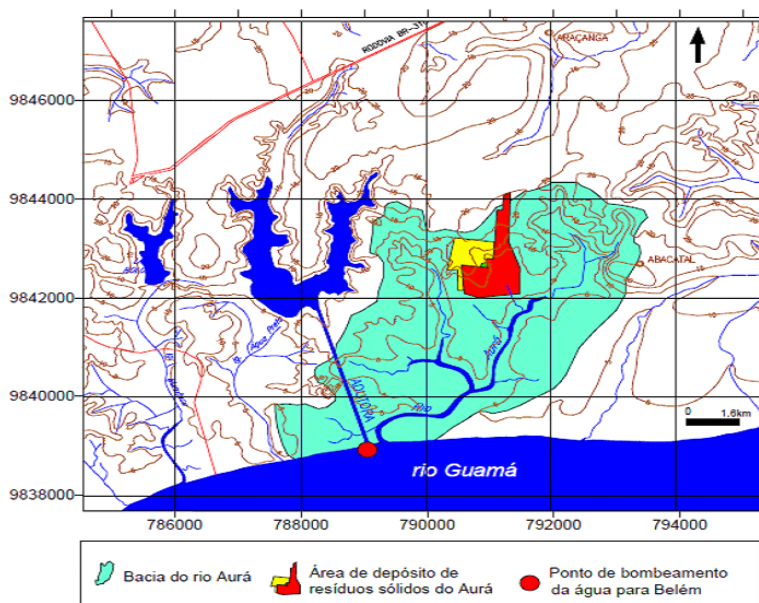


Figura 3.1 – Mapa de localização do Aterro do Aurá.
Fonte: MORALES (2002).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região metropolitana de Belém (RMB) se enquadra na categoria "equatorial úmido", com precipitação anual média de

2000 mm e temperatura média de 35 °C (FERREIRA e COSTA, 2006). As chuvas se estendem de dezembro a maio, enquanto que o período seco ou menos chuvoso vai de junho a novembro.

Belém é a maior metrópole da região norte do Brasil e a segunda maior da Amazônia. Sua região metropolitana é composta por cinco municípios: Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides e Santa Bárbara, os Distritos de Icoaraci e Mosqueiro e a Ilha de Caratateua, sendo que só o município de Belém ocupa uma área de 50.582,30 ha e possui aproximadamente 1.392.031 habitantes (IBGE, 2010). O aterro controlado do Aurá, vulgarmente conhecido como “lixão Aurá” foi fundado em 1987, e situa-se próximo a margem esquerda do Rio Aurá que por sua vez é afluente do Rio Guamá formando uma microbacia com drenagens de pequeno porte e pouca extensão, como os igarapés Santo Antônio, Pescada, Vêncio e Juruca. A Oeste da área, a aproximadamente 1.400 metros de distância, localizam-se os mananciais Bolonha e Água Preta, principais fontes de abastecimento da cidade região. Ao Sul encontram-se áreas de baixadas cobertas com densa vegetação que se estendem até o Rio Guamá, ao Leste limita-se com áreas despovoadas. Com altitude média de 10,8 metros, o depósito de lixo do Aurá é circundado por áreas de vegetação nativa e áreas remanescentes da floresta amazônica (BAHIA, 2003).

Conforme a Figura 3.2, os caminhos percorrido pelo lixo na região metropolitana de Belém, em quilômetros, até o local definitivo é: Ananindeua – Aurá: 8 km; Marituba – Aurá: 16 km; Belém – Aurá: 19 km; Icoaraci – Aurá: 20 km; Outeiro – Aurá: 28 km; Mosqueiro – Aurá: 58 km.

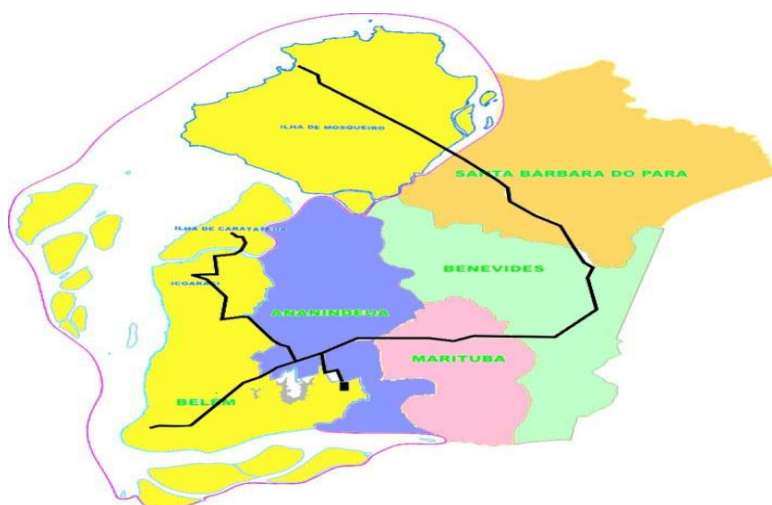


Figura 3.2 - Caminhos percorrido pelos resíduos.
Fonte: SESAM (2014).

3.2 MONITORAMENTO DE COLETAS

O monitoramento de coletas das amostras no aterro controlado do Aurá foi realizado no período de maio de 2015 a março de 2016 através de quatro campanhas, visando abranger o período sazonal que se caracteriza pela predominância de dois períodos, o mais chuvoso que envolve os meses de dezembro a maio e o menos chuvoso de junho a novembro.

3.3 PONTOS DE AMOSTRAGEM

A localização e coordenadas geográficas dos pontos de amostragem estão apresentados na Tabela 3.1. Foram selecionados sete pontos para coleta das amostras de chorume e do solo, visando uma amostragem global da área conforme ilustra a Figura 3.3. Os pontos foram distribuídos entre a lagoa principal de deposição do líquido percolado no aterro e as células que estavam desativadas devido a sua capacidade máxima de recebimento dos resíduos sólidos terem se esgotado.

Tabela 3.1: Pontos de Amostragem, localização e coordenadas geográficas.

PONTOS DE AMOSTRAGEM	LOCALIZAÇÃO DAS CÉLULAS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS
P1	Em frente a usina de gás, abrange as células 8,9,10 e 11 que foram unificadas quando desativadas.	SO 1° 25' 06,1" WO 48° 23' 05,4"
P2	Na saída do dreno de gás, abrange a unificação das células 12 e 13 que estão desativadas.	SO 1° 25' 10,5" WO 48° 23' 04,3"
P3	Em frente a lagoa principal de deposição, abrange a unificação das células 1,2,3,4 e 5 que estão desativadas, atualmente recebe apenas lama do BRT e dos canais.	SO 1° 25' 13,4" WO 48° 23' 04,4"
P4	Na extremidade direita da lagoa, de frente para o lixão	SO 1° 25' 01,2" WO 48° 23' 02,5"
P5	No centro da lagoa de deposição	SO 1° 25' 14" WO 48° 23' 01,4"
P6	Na extremidade esquerda da lagoa de deposição	SO 1° 25' 15,9" WO 48° 23' 00,7"
P7	Próximo a entrada do dreno que dá acesso a lagoa secundária	SO 1° 25' 20" WO 48° 23' 01,3"

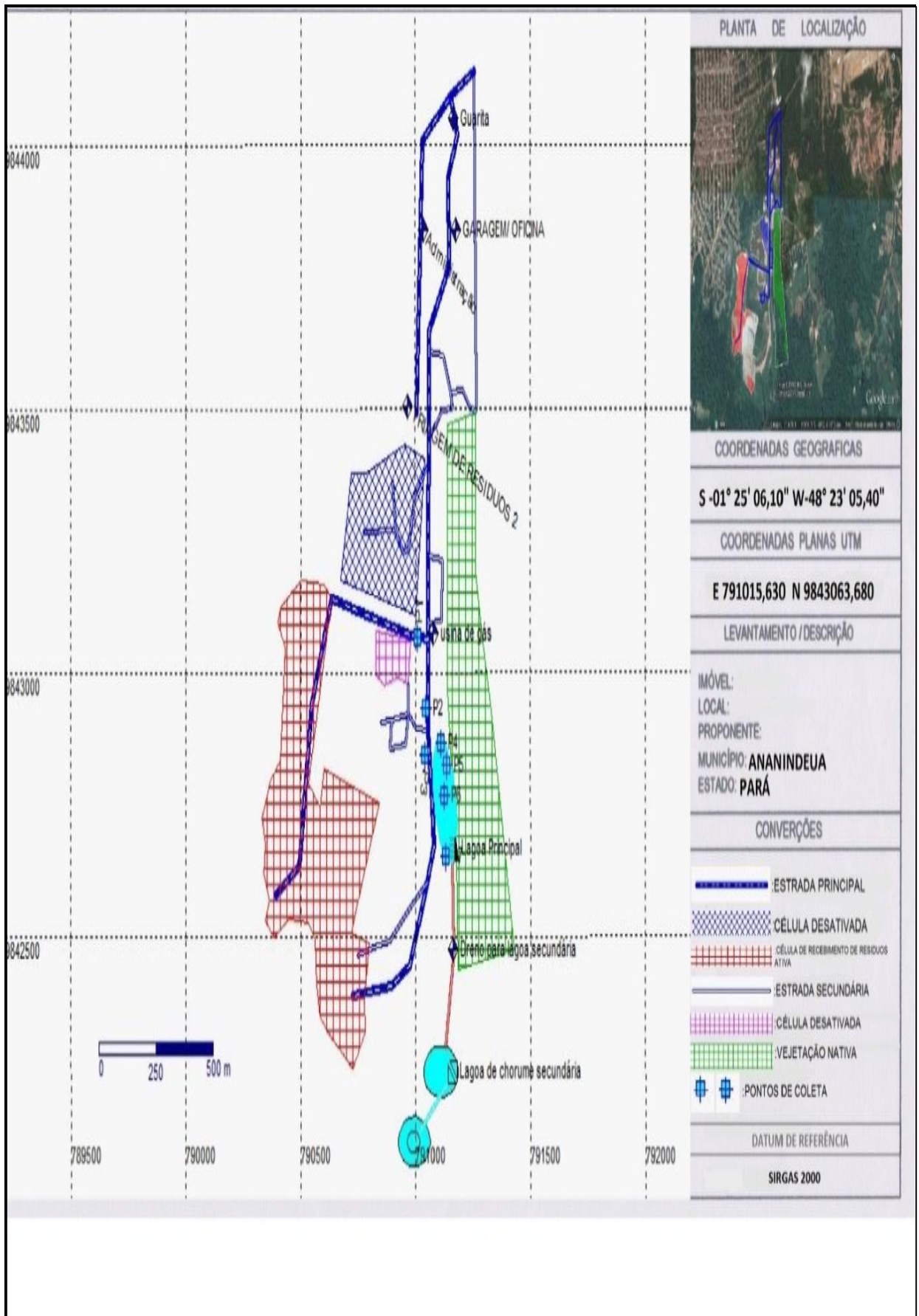


Figura 3.3 - Croqui de acesso aos pontos de amostragem.

3.4 COLETA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.4.1 Coleta e preparo das amostras do lixiviado

As amostragens do líquido lixiviado ao longo do aterro foram realizadas em duplicata, no ponto topograficamente mais baixo das células (Figura 3.4) e próximo à margem na lagoa receptora dos efluentes líquidos (Figura 3.5). As amostras do chorume foram acondicionadas em garrafas de polietileno com capacidade de 1 L (Figura 3.6), previamente lavadas com HNO_3 5 % e água destilada, levadas imediatamente ao Laboratório de Eng. Química da UFPA e acidificadas com 5 mL de HNO_3 P.A concentrado, baixando o pH para <2 , em seguida mantidas em refrigeração a 4°C até o momento da análise química no Instituto Evandro Chagas - IEC.



Figura 3.4 - Amostras do lixiviado coletado na base do aterro.



Figura 3.5 - Amostras do lixiviado coletado a margem da lagoa de deposição.



Figura 3.6 - Aspecto das amostras de choroume.

3.4.2 Coleta e preparo das amostras do solo

A amostragem do solo foi realizada também em duplicata com o auxílio de um trado manual de 6 cm de diâmetro. As amostras nos pontos P1, P2 e P3 conforme ilustrado na Figura 3.3, foram coletadas na base das células em contato com o choroume a uma profundidade de 30 a 40 cm. Nos pontos P4, P5, P6 e P7 as amostras foram coletadas na base do aterro e na lagoa de contenção e deposição (Figuras 3.7 e 3.8).



Figura 3.7 - Amostras do solo coletado na base do aterro.



Figura 3.8 - Amostras do solo coletado a margem da lagoa de deposição.

As amostras de solo foram armazenadas em sacos plásticos até a chegada ao Laboratório de Engenharia Química na UFPA, onde foram dispostas em bandejas para secagem em temperatura ambiente, destorroadas, homogeneizadas, quarteadas, peneiradas, em seguida separando-se a fração $< 0,075$ mm para posterior análise dos metais pesados Cu, Cr, Mn, Ni, Fe, Al e Zn.

3.5 ANÁLISE DOS ÍONS METÁLICOS

3.5.1 Análise do Cu, Cr, Mn, Ni, Fe, Al e Zn no lixiviado

As amostras de chorume após terem sido acidificadas com HNO_3 e mantidas sobre refrigeração até a data da análise, foram enviadas ao Laboratório de Toxicologia da Seção de Meio Ambiente do Instituto Evandro Chagas (IEC), para quantificação dos teores totais de Cu, Cr, Mn, Ni, Fe, Al e Zn.

A análise quantitativa nas amostras de chorume foi realizada em duas etapas: digestão e análise por Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Induzido (ICP OES), modelo Vista- MPX CCD simultâneo (Varian, Mulgrave, Austrália), configuração axial e equipado com um sistema de amostragem automático (SPS - 5).

Na etapa da digestão foram retiradas alíquotas de 5 mL do chorume e colocadas em tubos de borossilicato, onde adicionou-se 5mL de HNO_3 concentrado da marca Merk P.A e em seguida foram digeridas durante 40 min em micro-ondas da marca Berghof, modelo Speed wave 4. Após a digestão, as amostras foram transferidas

para tubos falcons e aferidas em 15 mL, a fim de serem analisadas as concentrações dos metais de interesse.

3.5.2 Análise do Cu, Cr, Mn, Ni, Fe, Al e Zn no solo

As amostras de solos, após procedimentos de secagem ao ar, quarteadas e peneiradas para obtenção da fração abaixo de 0,075 mm, foram enviadas ao Laboratório de Toxicologia da Seção de Meio Ambiente do Instituto Evandro Chagas (IEC), para quantificação dos teores totais de Cu, Cd, Cr, Ni, Al e Pb.

O processo de digestão das amostras de solo foi efetuado em tubos de borossilicato e submetido a bloco de digestão sob uma temperatura de 150 °C por 2 h no qual envolveu as seguintes etapas:

Decomposição de 250 mg de amostra, com uma mistura composta por 1 mL de ácido clorídrico (HCl) e 3 mL de ácido nítrico (HNO₃). Após digestão parcial, foi adicionado 1 mL de ácido fluorídrico (HF) às amostras, para a dissolução do precipitado e remoção de possíveis silicatos, e submetida novamente a aquecimento. Após esta etapa foram adicionados 2 mL de ácido bórico (H₃BO₃) para complexação de fluoretos remanescentes, e novamente submetida a aquecimento. Após resfriamento a mistura resultante foi transferida quantitativamente para frascos graduados com volume de 25 mL.

3.6 ADSORÇÃO

3.6.1 Materiais

3.6.1.1 Adsorvente

O material adsorvente utilizado nos ensaios de adsorção foi a zeólita hidroxisodalita produzida por DIAS *et al.* (2015), sintetizada a partir da cinza volante de carvão mineral que é um dos resíduos resultantes da queima de carvão mineral na fornalha de leito fluidizado circulante da caldeira de vapor de média pressão e alta capacidade da termoelétrica de autoprodução da refinaria Hydro Alunorte, localizada em Barcarena-PA.

3.6.1.2 Areia

A areia foi disposta em bandeja de alumínio e levada à estufa em uma temperatura de 95°C por 2 horas para retirar a umidade. A seguir foi peneirada para obter a porção entre o passante de 65 mesh e o retido de 100 mesh. Para remoção das impurezas a areia foi tratada com solução de ácido nítrico 5% e lavada com água destilada até pH 7 e em seguida seca a 100°C e calcinada a 700°C.

3.6.1.3 Adsorvato

A solução salina sintética contendo o íon metálico cobre utilizada no processo de adsorção foi preparada a partir do Sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). A água ultrapura utilizada no procedimento foi obtida através do sistema purificador do tipo Milli - Q.

3.6.2 Reagente analítico

A solução padrão de cobre (II) utilizada foi preparada a partir do Sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) da marca NEON com 98% de pureza.

3.6.3 Ensaio de adsorção em coluna de leito fixo

O experimento em coluna de leito fixo foi realizado em uma coluna de polietileno com diâmetro (D_L) de 4,5 cm, altura (H_C) de 27 cm, sendo a altura do leito (H_L) igual a 4 cm a qual foi preenchida com material adsorvente.

O preenchimento do leito na coluna foi realizado manualmente, adicionando primeiro uma camada de areia com 1 cm de altura, seguido do material adsorvente (20% zeólita ZSH + 80% de areia) em uma altura de 2 cm e por fim, para manter fixo o material adsorvente dentro da coluna, mais uma camada de 1 cm de areia, totalizando em 4 cm a altura do leito na coluna. A zeólita ZSH (zeólita sintetizada pelo método hidrotérmico) usada neste experimento foi produzida por DIAS *et al.*, 2015.

Após o preenchimento da coluna para realização dos ensaios de adsorção, a coluna de leito fixo foi alimentada no sentido descendente com solução de Sulfato de cobre, armazenada em um béquer, que com auxílio de uma bomba leva a solução até a

coluna e retorna ao béquer para um novo contato com o adsorvente em sistema de fluxo contínuo.

As amostras do efluente da coluna foram coletadas em função do tempo, em intervalos de 2 até 20 minutos, sendo que a partir desse tempo aumentou-se o intervalo e coleta para 5 minutos até o final do experimento em 120 minutos, totalizando 30 amostras.

Retirou-se alíquotas de aproximadamente 5 mL pela válvula de saída no final da coluna, conforme está demonstrado na Figura 3.9. Os teores de cobre remanescente na solução que passa pela coluna foram analisados por espectrometria de emissão atômica de plasma (ICP-OES).

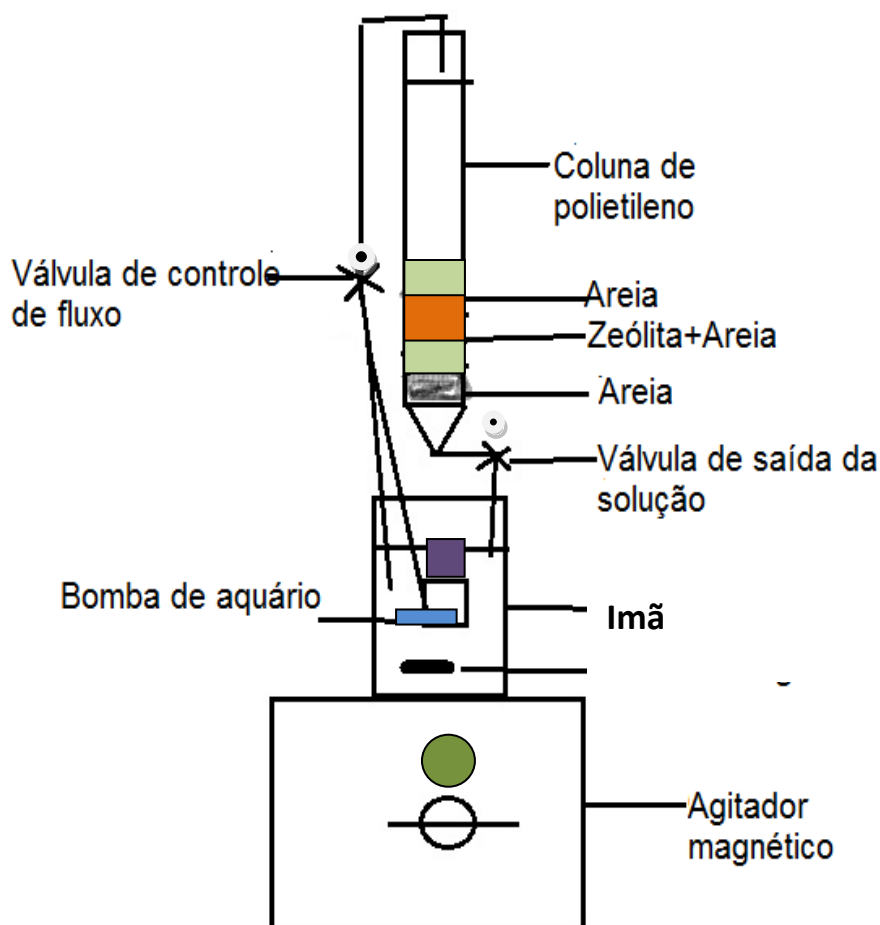


Figura 3.9 - Esquema da coluna de leito fixo.

A Tabela 3.2 apresenta as condições experimentais adotadas no experimento para adsorção de Cu^{2+} em coluna de leito fixo, sem alteração no pH do adsorvato.

Tabela 3.2 Condições adotadas no experimento em que foi analisada a capacidade de adsorção de Cu^{2+} .

PARÂMETROS EXPERIMENTAIS	
Diâmetro interno da coluna (D_L)	4,5 cm
Altura do leito (H_L)	4,0 cm
Vazão de saída do sistema (Q)	5,2 mL/min
Concentração inicial de Cu^{2+}	57,73 mg/L
Massa de zeólita (m_{ZSO})	7,5 g
Massa de areia (m_{areia})	78 g
Diâmetro médio da partícula de zeólita (D_p)	7,1 μm
Altura total da coluna (H_C)	27 cm
Volume do leito (V_L)	63,6 cm^3
Volume de solução de Sulfato de Cobre	1000 mL
Temperatura ambiente	25 \pm 2 $^\circ\text{C}$
Tempo do experimento	120 min

A Figura 3.10 ilustra a coluna de leito fixo utilizada nos experimentos para adsorção do íon Cu^{2+} .

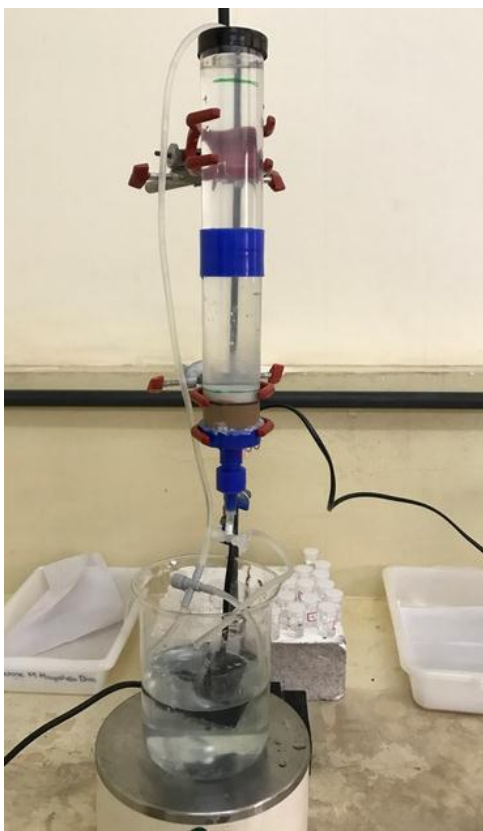


Figura 3.10 - Sistema operacional de adsorção em coluna de leito fixo.

3.6.3.1 Determinação da porosidade do leito

A porosidade do leito é um dos parâmetros requerido para a simulação dinâmica (curvas de ruptura) de adsorção de cobre. A porosidade foi determinada a partir da medida do volume de vazios ($V_L = 33 \text{ cm}^3$) do leito de percolação, a qual apresenta um diâmetro interno (D_L) de 4,5 cm e altura (H_L) de 4 cm. Inicialmente o leito foi preenchido com 1 cm de areia, 2 cm da mistura do adsorvente zeolítico com areia, na proporção de 1:4, e mais 1 cm de areia, totalizando a altura média de 4 cm. Em seguida, adicionou-se a solução salina padrão lentamente até preencher a altura do leito. O volume de vazios do leito (V_V) foi medido pelo volume de solução necessário para completar o leito até a altura máxima do mesmo. Assim, a fração de vazios ou a porosidade do leito (ε) foi determinada pela Equação 3.1.

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_L} \quad (3.1)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES METAIS NO LIXIVIADO E SOLO DO ATERRO

A Tabela 4.1 produzida pelo Instituto Evandro Chagas apresenta as leituras das amostras de líquidos percolados coletadas nas quatro campanhas feitas no Aurá durante o período seco e chuvoso e comparados com os limites máximos para Classe I – Águas doce/ Resolução CONAMA 357/2005 e 430/2011.

Tabela 4.1: Limites máximos comparados com a média das amostras de líquidos percolados.

	Lim.máx 1 mg/L	Lim.máx 5 mg/L	Lim.máx 0,05 mg/L	Lim.máx 2 mg/L	Lim.máx 5 mg/L	Lim.máx 0,1 mg/L	Lim.máx 0,2 mg/L	Lim.máx 0,5 mg/L	Lim.máx 15 mg/L	Lim.máx 0,05 mg/L	Lim.máx 1,0 mg/L
Amostras mg/L	Cu 327,395	Zn 213,857	Co 28,8923	Ni 231,604	Ba 455,403	Al 396,52	Cd 214,439	Pb 220,353	Fe 238,304	Cr 267,716	Mn 257,610
Branco Chorume	0,016	0,018	- 0,015	- 0,010	- 0,044	- 0,005	0,006	- 0,011	- 0,008	0,003	- 0,037
Água	0,015	0,006	- 0,014	- 0,013	- 0,045	- 0,018	0,004	- 0,010	- 0,121	- 0,001	- 0,038
CC1A	0,858	2,624	- 3,805	0,372	- 0,907	82,368	0,274	0,079	100,622	0,65	2,12
CC1B	1,040	3,167	- 4,765	0,434	- 0,349	40,712	0,328	- 0,082	124,805	0,57	2,99
CC2A	0,901	1,526	- 1,713	0,540	- 0,367	39,573	0,261	- 0,421	36,885	3,66	- 0,35
CC2B	1,093	1,474	- 2,009	0,662	- 0,252	43,611	0,267	1,122	44,213	3,90	- 0,33
CC3A	1,393	14,827	- 20,831	0,316	1,649	356,428	0,280	0,169	607,889	0,71	2,94
CC3B	1,426	9,242	- 13,843	0,338	0,540	250,035	0,203	- 0,154	401,082	0,66	1,90
CL4A	0,997	1,752	- 8,728	- 0,117	- 1,205	80,833	0,277	- 0,612	241,385	0,44	0,80
CL4B	0,716	0,640	- 2,436	- 0,260	- 1,603	9,249	0,231	- 0,616	52,775	0,08	- 0,80
CL5A	0,625	0,608	- 2,792	- 0,239	- 1,506	10,403	0,203	- 0,430	62,275	0,11	- 0,52
CL5B	0,742	0,775	- 2,823	- 0,088	- 1,483	14,314	0,250	- 0,654	63,989	0,09	- 0,47
CL6A	0,929	1,184	- 3,192	- 0,412	- 1,393	14,784	0,269	- 0,807	72,471	0,11	- 0,17
CL6B	1,279	2,088	- 3,168	- 0,107	- 1,397	22,153	0,261	- 0,274	72,109	0,20	- 0,21
Branco Sedimento	0,018	0,023	- 0,019	- 0,107	- 0,043	0,916	0,004	- 0,007	0,012	- 0,001	- 0,037
AC2709	35,755	96,045	- 996,232	63,132	895,203	85669,200	6,020	13,820	27346,800	87,515	448,434
AC2710	2938,670	3033,590	- 1093,200	4,729	602,026	43967,600	12,829	3732,010	28690,200	17,196	1550,310
AC2711	100,693	259,219	- 720,368	13,664	561,898	51316,900	33,472	781,729	19573,000	29,982	465,162
SC1A	39,896	66,023	- 1189,980	6,941	70,598	30078,100	3,314	37,919	26785,100	94,320	80,116
SC2A	74,989	61,774	- 1104,030	7,648	81,876	82118,700	3,798	30,726	25221,800	99,075	90,633
SC3A	82,509	67,506	- 1061,810	5,770	201,490	48393,200	3,260	28,267	24308,300	86,222	91,394
SC1B	2,949	16,755	- 950,721	4,318	22,028	26157,800	3,858	20,062	18783,600	67,993	37,191
SC2B	4,094	12,021	- 137,791	1,034	9,845	11310,00	1,773	10,511	3160,790	27,051	13,886
SC3B	7,492	35463	- 754,066	4,821	31,906	29489,700	2,493	23,094	15987,300	69,957	34,970

CC – Chorume Célula, CL - Chorume Lagoa, SC – Solo Célula, SL – Solo Lagoa, AC – Amostra Certificada, N° 1,2,3,4,5,6,7 – Pontos de coletas de chorume/solo conforme croqui da Figura 3.3.

Os resultados apresentados na Tabela 4.1 demonstram que solos argilosos apresentam uma maior capacidade de reter metais pesados, entretanto o solo da área do lixão apresenta-se totalmente saturada, uma vez que não possui a capacidade de inertização atribuída a um solo do tipo argiloso, já que teores de ferro (Fe), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), Manganês (Mn) e zinco (Zn) aparecem em altas concentrações em algumas células, ou seja, a capacidade de retenção dos metais pesados já foi ultrapassada.

4.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA REALIZADA NA ZEÓLITA SINTETIZADA

A Figura 4.1 apresenta a análise granulométrica realizada na zeólita sintetizada denominada de ZSH.

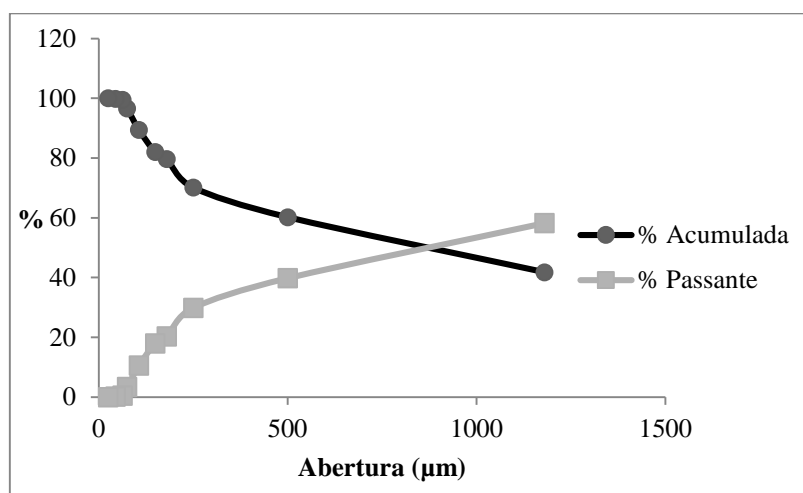


Figura 4.1 Análise Granulométrica da Zeólita

Nota-se a partir da Figura 4.1 que aproximadamente 80% do material encontra-se acima da peneira de 80 *mesh*, ou seja, com diâmetro acima de 180 μm. Trata-se com diâmetro médio de massa 0,2332 mm e com esta granulometria apresenta uma área superficial que favorece a adsorção de contaminantes (análise granulométrica realizada no laboratório de reologia da Faculdade de Engenharia Química da UFPA).

4.3 ANÁLISE DE ADSORÇÃO

A Figura 4.2 apresenta o gráfico de adsorção de Cu^{2+} no material zeolítico em função do tempo.

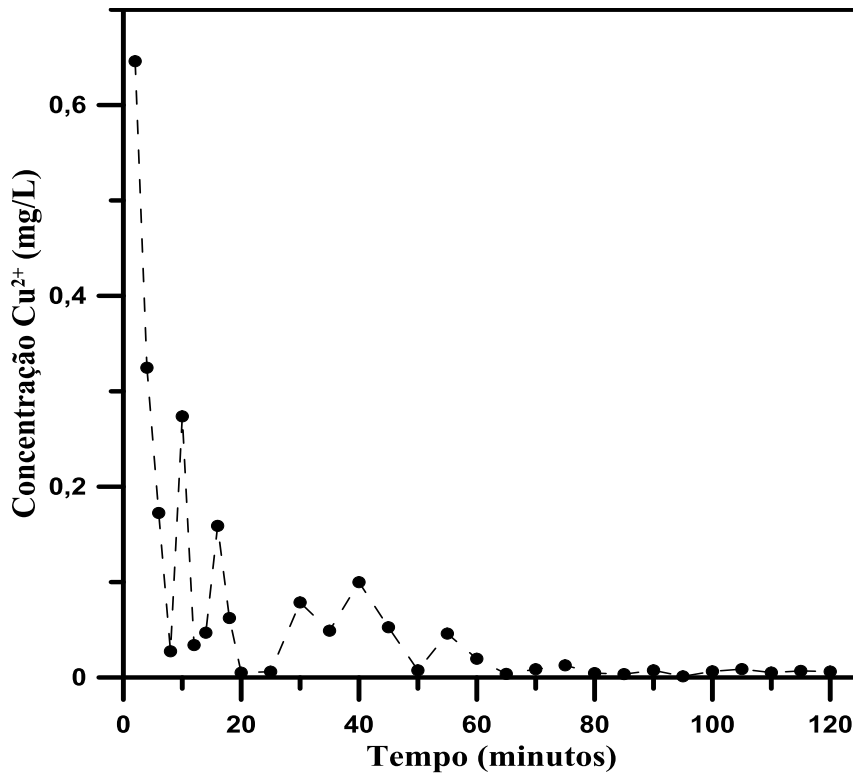


Figura 4.2 – Adsorção de Cu²⁺ em zeólita ZSH.

Nota-se da Figura 4.3 que a zeólita denominada ZSH utilizada como adsorvente apresenta uma excelente capacidade de remoção do íon Cu²⁺. Observa-se que, em aproximadamente 65 minutos de percolação, a concentração do íon Cu²⁺ partiu de 0,65 mg/L (ppm) para 0,06 mg/L (ppm), que de acordo com Resolução CONAMA 357/2005 e 430/2011, este encontra-se entre os limites máximos estabelecidos se comparados com a média das amostras de líquidos percolados. Portanto, fica comprovado que a zeólita ZSH, utilizada aqui como adsorvente, tem potencial para tratamento de efluentes líquidos oriundos de aterros sanitários.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Através de análise química foi possível determinar a concentração de metais pesados nas amostras de chorume e solo do aterro do Aurá. Verificou-se que embora os solos argilosos apresentem uma maior capacidade de reter metais pesados, o solo presente na área do lixão apresenta-se totalmente saturado, uma vez que os teores de ferro (Fe), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), Manganês (Mn) e zinco (Zn) aparecem em altas concentrações em algumas células, mostrando que a capacidade de retenção dos metais pesados já foram ultrapassadas.

Através de análise granulométrica, verificou-se que o diâmetro médio das partículas do solo do aterro, apresentaram um diâmetro médio de massa de 0,2332 mm, apresentando uma área superficial que favorece a adsorção de contaminantes.

A zeólita ZSH utilizada nos experimentos apresentou uma elevada capacidade de adsorção, uma vez que foi possível adsorver todo o íon Cu^{2+} após, aproximadamente, 65 minutos de experimento. De acordo com Resolução CONAMA 357/2005 e 430/2011, esta quantidade encontra-se entre os limites máximos estabelecidos.

Portanto, fica comprovado que a zeólita ZSH, utilizada como adsorvente, tem potencial para tratamento de efluentes líquidos oriundos de aterros sanitários.

Ressaltando que o íon Cu^{2+} usado no experimento serve como parâmetro para que os demais íons possam ser avaliados também com a mesma eficiência, uma vez que a zeólita ZSH utilizada nos experimentos apresentou uma elevada capacidade de adsorção.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à grande abrangência do assunto abordado neste estudo, são apresentadas, a seguir, algumas sugestões para a continuação do presente trabalho:

- Avaliar a adsorção utilizando diferentes quantidades de adsorvente;
- Realizar o processo de adsorção em outros tipos de zeólitas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8418/1984 apresentação de Projetos de aterros de resíduos industriais perigosos: Procedimento.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2010.pdf> Acessado em: 19/03/2016.

ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; BERTON, R. S. Análise química de solos para metais pesados. In: Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. v. 2. p. 645 – 692. 2002.

AGUIAR, M.R.P.; NOVAES, A.C. & GUARINO, A. W.S., 2002, “Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos”. **Química Nova**, v. 25, n. 6b, pp. 1145-1154.

ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils**, New York, John Wiley, 1990, p. 339.

ARAÚJO, M.L; SOUSA, S.N; LOBATO, V.C. Análise da disposição do lixo na cidade de Belém-PA: o caso do lixão do Aurá. Para Onde!? v.6, 2010.

AZEVEDO, A. C., DALMOLIN, R. S. D. **Solos e Ambiente: uma introdução. Santa Maria**, Ed Pallotti, 2004. 100 p.

BAHIA, V. E. **Estudo hidrogeológico da área localizada entre o Depósito de Lixo Metropolitano de Belém (Auré) e o Lago Água Preta**.2003.Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 117 p.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 357/1 de 17/03/2005. Classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes. Publicada no Diário Oficial da União de 18/03/2005.

BRECK, D. B. **Zeolitic Molecular Sieves: structure, chemistry, and use**. New York: A Wiley - Intersciencepublication, 1974.

BRUSCHI, D. M. **Análise do Programa Minas sem lixões: contribuição à gestão de resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais**, 2003 – 2010. 2011. 281 p. Dissertação

(Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

CASTILHO-JR, A.B, Principais processos de degradação de resíduos urbanos In: Resíduos sólidos urbanos: Aterro sustentável para municípios de pequeno porte. ABES, Rio de Janeiro, 1ª Ed. 2003.

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Instituto de Resíduos Sólidos, 2007. disponível em: <[http:// www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)> Acesso em: 18/10/2016.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília, 2005. 27p.

CONAMA Nº 430/2011 – Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 359 de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em www.mma.gov.br/port/conama - Acesso em 27 de junho de 2017. .

CONCIANI, R. **Estudos de barreiras de solo compactado para retenção de contaminantes**. 2011. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

COSTA, S. **Estudo da concentração de metais pesados no solo e nas plantas de áreas de mineração de carvão**. 2004. 39f. Relatório Final (Programa de Iniciação Científica), Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2004.

DIAS, S.F, *et al.* **Zoneamento ecológico econômico do Estado do Pará**. Belém: IDESP, 1991. v.1 (IDESP - Estudos Paraenses, 058).

DIAS, L. M.M.; SILVA, M. V. R.; MACÊDO, A.N.; SOUZA, J.A.S.; HILDEBRANDO, E.A. Síntese de material zeolítico a partir de cinza volante utilizando Na₂CO₃. 59 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2015.

DUARTE, R. P. S & PASCOAL, A. Avaliação do cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn) em solos, plantas e cabelo humano. **Energia na Agricultura**, vol. 15, n. 1, p. 46-58, 2000.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Como destinar os resíduos sólidos urbanos. FEAM, Belo Horizonte, 47p, 2011.

FERREIRA, M.; COSTA, T. 2006. Natural aggregate potential and associated environmental problems in the Aura portion, Belem metropolitan region (BMR), State of Para, Brazil. *The Geological Society of London – IAEG*, 187: 1-13.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C. Tratamento e Disposição Final de Resíduos / Modelagem Cinética da Remoção de Cd^{2+} por Zeólitas de Cinzas de Carvão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais** – n.16, 2008.

FUNGARO, D. A.; SILVA, M. Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água. **Química Nova**, v. 25, n. 6B, p. 1081-1085, 2002.

GIANNETO, G. **Zeólitas, características, propiedades y aplicaciones industriales**, Edt Ediciones Innovación Tecnológica: Caracas, 1990.

GUIMARÃES, C. P. **Aplicação de indicadores da qualidade ambiental em um aterro sanitário no norte de Mato Grosso**. 2009. 63f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso.. Cuiabá, 2009.

HANN, F. A. M. de; ZWERMANN, P. J.; Pollution of Soils. In: Bolt, G. H.; Bruggenwert, M. G. M.; SOIL CHEMISTRY, A. Basics Elements. *Developments in Soil Science 5^a*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. p 192-271.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e estatística, 2002. 397p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Síntese de indicadores sociais – 2003. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 29 jul.2016.

IBGE - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. 2008 [Acesso em: 23 de mar 2016]. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>.

IBGE – Censo demográfico. 2010 [Acesso em: 23 de junho 2016]. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>.

IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2.ed. São Paulo. IPT/CEMPRE, 370p. 2000.

KAWAHIGASHI, F. **Aplicabilidade do pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário por adsorção em carvão ativado granular e avaliação ecotoxicológica.** 2012. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina.. Londrina, 2002.

KAWAHIGASHI, F. *et al.* Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **EngSanitAmbient**, v. 19, n. 3, p. 235-244, 2014.

KEMERICH, P. D. C. *et al.* Caracterização do solo em área submetida a derramamento de lixiviado decorrente de aterro sanitário. *Monografias Ambientas*, v. 14, n. 1, p. 2950-2959, 2014.

LIMA, L.M.Q. **Lixo -Tratamento e Bio-remediação**, São Paulo - Hemus Editora Ltda, 1995.

LISBOA, AMANDA.; MORAIS, G. C. N. **Determinação da sorção de chorume em xisto retornado.** 2013. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia de Processos Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.. Curitiba, 2013.

LUZ, A. Zeólitas: propriedades e usos industriais. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 1995.
MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; JORDÃO, C.P.; COSTA, L.M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.379-386, 1996.

MATOS, A. T.; FONTES, M. P. F.; JORDÃO, C. P. *et al.* Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho – Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 379 – 386, 1996.

MATTA, M.A. DA S. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará**, Brasil. Belém: 2002. Tese (Doutorado em Hidrogeologia). Centro de Geociências – UPA..

MAURÍCIO, Rosana Gouvêa. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário utilizando processos de separação de membranas e zeólita natural.** 2014. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.. Rio de Janeiro, 2014.

MEIRA, J. C. R. Chorume do Aterro Sanitário de Goiânia: **Tratamento por Floculação/Coagulação/Degradação Fotoquímica e Custos Operacionais.** 2003.

125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.

MORALES, G. P. **Avaliação ambiental dos recursos hídricos, solos e sedimentos na área de abrangência do Depósito de Resíduos Sólidos do Aurá.** Universidade Federal do Pará, Belém: 2002. (Tese de Doutorado).

NASCIMENTO, M; NEUMANN, R; CUNHA, E.R. Estudo termodinâmico da formação de zeólitas a partir de cinzas de carvão. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 9, n. 1, p. 11-15, 2012.

NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 71p. 2004.

NBR 10006 – Procedimentos para obtenção de extratos solubilizados de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 3p. 2004.

NBR 10007 – Amostras de Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 21p. 2004.

Plano de gestão integrada de resíduos sólidos para Região Metropolitana de Belém. Inclusão social de catadores do Aurá. SESAN – Secretaria de Saneamento de Belém. 2014.

PIRATOBÁ MORALES, G. (2002), **Avaliação ambiental dos recursos hídricos, solos e sedimentos na área de abrangência do Depósito de Resíduos Sólidos do Aurá.** Tese de Doutorado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 220p.

QUEROL, X., MORENO, N., UMANÃ, J. C., ALASTUEY, A., HERNANDEZ, E., LÓPEZ-SOLER, A., PLANA, F. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. **Int. Journal Coal Geol.**, v. 50, p. 413 - 423, 2002.

REVISTA TAE. Lixiviado de aterro sanitário, impactos e alternativas de tratamento. Santo André, 2011. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=3356>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2017, 12h33min.

RIBEIRO FILHO, M.R.; SIQUEIRA, J. O.; CURTI, N.; SIMÃO, J. B. P. Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados em solo contaminado, incubado com materiais

orgânicos e inorgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 495 – 507, 2001.

RODRIGUES, F. S. F. **Aplicação da ozonização e do reativo de Fenton como pré-tratamento de chorume com os objetivos de redução da toxicidade e do impacto no processo biológico**. Rio de Janeiro, 2004, 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SANTOS, P.C.V. **Estudo da contaminação de água subterrânea por percolado de aterro de resíduos sólidos - Caso Jockey Club - DF**. Brasília, 1996, 135p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

SILVA, A. A.; GALVÃO, R. B.; ASSUNÇÃO JÚNIOR, V. G. Pós-tratamento de lixiviado do aterro sanitário de Cianorte-PR por filtração ascendente em pedregulho seguida de adsorção em carvão ativado granular. **X Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 12, p. 220-233, 2014.

SIMÃO, J. B. P., SIQUEIRA, J. O. Solos contaminados por metais pesados: características, implicações e remediações. In: Recuperação de áreas 63 degradadas, Belo Horizonte, v. 22, n. 210, p. 18-26, maio/junho. 2001. (Informe Agropecuário).

SISINO, C. L. S. **Destino dos resíduos sólidos urbanos e industriais no estado do Rio de Janeiro: avaliação da toxicidade dos resíduos e suas implicações para o ambiente e para a saúde humana**. 2002. 97 f. Tese (Doutorado) – Curso de Ciências, Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://teses.icict.fiocruz.br/pdf/sisinnoclsd.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

SOARES, M.R., 2004. **Coefficiente de distribuição (Kd) de metais pesados em solos do Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil. 202pp.

VIEIRA, L.S.; SANTOS, P.C.T. (1987) **Amazônia: seus solos e recursos naturais**. AgronômicaCeres., 416p.