MARJOLLY PRISCILLA BAIS SHINZATO

**Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de lixão
desativado**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Doutora em Ciências: Engenharia
Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Tit. Edson Cezar Wendland
Coorientador: Prof. Assoc. Valdir Schalch

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S556m Shinzato, Marjolly Priscilla Bais
Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de
lixão desativado / Marjolly Priscilla Bais Shinzato;
orientador Edson Cezar Wendland; coorientador Valdir
Schalch. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Depósitos de resíduos antigos. 2. Lixiviado
velho. 3. Poluição ambiental. 4. Erradicação de lixões.
5. Encerramento de aterro sanitário. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MARJOLLY PRISCILLA BAIS SHINZATO**.

Título da tese: "Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de lixão desativado".

Data da defesa: 19/09/2014

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **Jurandyr Povinelli**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **José Galizia Tundisi**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Reginaldo Antono Bertolo**
(Instituto de Geociências-IGC/USP)

Dr. **Romeu Francisco Gadotti**
(Fundação Nacional de Saúde/FUNASA)

Resultado:

Aprovada

Aprovada

Aprovado

APROVADA

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Dedicatória

Ao nosso grande amigo João Carlos da
Silva (em memória).

AGRADECIMENTOS

Nunca pensei em sair da minha cidade natal, Campo Grande (MS), mas quando encontramos nossa metade da laranja, não tem como ficar longe. Por isso, mudei para São Carlos (SP), seguindo os passos do namorado, hoje marido e pai do meu filho (nosso querido Caio). Aqui reforcei minha vontade de seguir carreira acadêmica e fiz amigos que vou levar pra vida inteira (Taís, Line e Okamoto, Drica, Elô, Rê, Daysy e Martins, Bidjei e Aline, Marinho, Ana Abreu, Jana e a turma do LHC e do Labsim).

Esta pesquisa começou com a ideia “maluca” do prof. Edson em escavar um poço no meio do lixão e a ele eu agradeço pela ideia, carta de aceite, orientação, viabilização do projeto, confiança e por sua casa. Foi uma batalha arranjar gente pra trabalhar no lixão e por isso agradeço demais ao poceiro João Carlos da Silva (em memória), à American Drilling, e à equipe minha magnífica equipe de trabalho de campo (Leandro, jipe Samurai, Aline, Nathe, Bérghamo e Marcelo), sem vocês eu não teria uma tese.

Agradeço ao professor Valdir e a equipe do Laboratório de Saneamento, em especial ao Júlio, ao Paulo, à Cidinha e à Sabrina, por me transmitir experiências do lixão e de análises com tanta paciência.

Agradeço ao pessoal da secretaria do SHS, Sá, Rose, Lu, Pri, Pavi, Flávia e Fernanda por anos de “resolve problemas” e burocracias. Vocês são demais.

Ao CNRD, ITT, DAAD, CNPq, CAPES, PROEX e FAPESP (Processo nº 2011/08105-0) agradeço pelo financiamento do projeto, bolsa de doutorado e pelo período de intercâmbio na Alemanha.

Agradeço também pelo suporte emocional de toda minha família, em especial pais, sogros, Trick, Gamby, Elli, Godo (em memória), Lúscas, Ana Julia, Felipe, tia Andrea, tia Jô e tio Flávio. Obrigada pela amizade eterna Kari, Ká, Sassá, Sú, Dani, Tata, Carol, Jabota, Fran e Bia. E não poderia deixar de agradecer aos amigos bichos (Petit, Zupa, Splodi, Kenai, Gatotô e Pity).

Por fim, se eu pudesse atribuir ordem de grandeza para a gratidão, faço um agradecimento tendendo ao infinito para meu Lelê e ao meu Caio. Este trabalho tomou muito tempo que deveria ser dedicado a vocês e, por isso, por tudo que já vivemos e por tudo que ainda vamos viver que, digo do fundo do meu coração: AMO VOCÊS.

*“(...) Tudo aquilo que a nossa
civilização rejeita, pisa e mija em cima,
serve para poesia (...)
(...) As coisas jogadas fora
têm grande importância
- como um homem jogado fora
Aliás, é também objeto de poesia saber
qual o período médio que um homem jogado fora
pode permanecer na Terra (...).”*

Manoel de Barros

RESUMO

SHINZATO, M. P. B. **Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de lixão desativado**. 2014. 198f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

O lançamento dos efluentes de depósitos de resíduos no ambiente altera significativamente a qualidade das águas. Apesar do amplo acervo de dados sobre os mecanismos de formação do lixiviado e das mudanças de sua qualidade nas diferentes fases do aterro, pouco se sabe sobre os mecanismos de mobilização de poluentes do maciço de resíduos para o lixiviado e da interação deste com as águas subterrâneas e o meio geológico. A compreensão destes processos é essencial para orientar critérios de estabilidade destes aterros e para avaliar se o maciço de resíduos não representa mais uma ameaça para o ambiente. Nesse sentido, um poço de 1,5 m de diâmetro com lisímetros de sucção instalados em diferentes profundidades foi instalado dentro do maciço de resíduos do lixão desativado de São Carlos/SP para análise do conteúdo aterrado e do lixiviado em camadas de resíduos com diferentes idades de deposição. Amostras de águas subterrâneas coletadas em poços de monitoramento a montante, dentro e a jusante do maciço também foram analisadas. Concluiu-se que o lixão está na fase metanogênica e que o maciço é composto por chorume imóvel com elevadas concentrações de poluentes e por resíduos não inertes. Condições redutoras e de tamponamento são mantidas constantes no lixão, as quais controlam as reações redox ocorrentes no maciço e a qualidade do lixiviado. A mobilização de Fe, Ca, Mg, K, Na, Ni, Zn, Pb e Cd do maciço para o lixiviado apresentou-se mais significativa sobre os demais elementos avaliados e ocorre a partir dos resíduos sólidos aterrados e dos solos de cobertura. Os principais parâmetros de interesse ambiental identificados no lixiviado foram nitrogênio amoniacal, Cd, Cr, Pb, NO_3 e DBO_5 e nas águas subterrâneas foram nitrogênio amoniacal, Cr, Cd, Al, Ni, Fe, Mn e Pb. A análise dos dados de qualidade do conteúdo aterrado e do lixiviado comprovou uma significativa mobilização de poluentes dentro do maciço de resíduos do lixão desativado de São Carlos/SP. Apesar de estar desativado há 18 anos, o maciço de resíduos ainda é fonte primária de poluentes, comprovando seu potencial remanescente de contaminação, principalmente para as águas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e do manancial Ribeirão do Feijão. Portanto, o monitoramento da área não pode ser descontinuado.

Palavras-chave: Lixiviado velho. Depósitos de resíduos antigos. Poluição ambiental.

ABSTRACT

SHINZATO, M. P. B. **Mobilization of pollutants in waste mass of an uncontrolled landfill**. 2014. 198p. Thesis (PhD) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

The effluent release of waste disposal sites in the environment alters significantly the water quality. Despite the large collection of data about leachate formation mechanisms and its quality changes in the different landfill phases, very little is known about pollutants mobilization in solid waste of an uncontrolled landfill and its interaction with groundwater and geological environment. Understanding these processes is essential to guide stability criteria for these landfills and to assess whether the waste mass no longer represents a threat to the environment. Thus, a dug well with 1.5 meter diameter equipped with suction lysimeters in different depths was installed within the solid waste mass of the uncontrolled landfill of São Carlos/SP to analyze the landed content and the leachate in different aged waste layer. Groundwater samples collected at monitoring wells upstream, within and downstream of the massif were also analyzed. It was concluded that the landfill is in methanogenic phase and that the waste body is composed by immobile leachate with high concentrations of pollutants and by non-inert solid waste. Reductive and tamponade conditions are kept constant in the waste mass, which control the redox reactions occurring in the mass and the quality of leachate. The mobilization of Fe, Ca, Mg, K, Na, Ni, Zn, Pb and Cd from the solid waste to the leachate is very significant and occur from the landed solid waste and from the soil cover. The main parameters of environmental interest identified in the leachate were ammonia nitrogen, Cd, Cr, Pb, NO₃ and BOD₅ and in groundwater were ammonia nitrogen, Cr, Cd, Al, Ni, Fe, Mn and Pb. Data analysis of grounded content quality and leachate quality has proved significant mobilization of pollutants within the waste mass of uncontrolled landfill of São Carlos. Despite being deactivated 18 years ago, the waste mass is still a primary source of pollutants, proving its remaining potential contamination, mainly for water of Guarani Aquifer System (SAG) and of Ribeirão do Feijão river. Therefore, monitoring of the area can not be discontinued.

Key words: Old leachate. Aged landfills. Environmental pollution.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Absorbância
Ag	Prata
Al	Alumínio
APA	Área de Proteção Ambiental
APREM	Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município de São Carlos
As	Arsênio
ASA	Amostra sólida aterrada do maciço do lixão
ASD	Amostra sólida deformada do maciço do lixão
ASI	Amostra sólida indeformada do maciço do lixão
ASL	Amostra sólida legível do maciço do lixão
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Cd	Cádmio
CE	Condutividade elétrica
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH	Hemicelulose
CH ₄	Gás metano
Cl	Chorume imóvel
Cl ⁻	Cloreto
Co	Cobalto
CO ₂	Gás carbônico ou dióxido de carbono
CO ₃	Carbonato
COD	Carbono orgânico dissolvido
COT	Carbono orgânico total
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
D	Poço de monitoramento dentro do maciço do lixão
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
Eh	Potencial redox
ES	Extrato de solubilização do material aterrado
ESB	Extrato de solubilização da base do lixão
ESA	Extrato de solubilização da areia suporte dos lisímetros de sucção
Fe	Ferro
F ⁻	Fluoreto
HCO ₃	Bicarbonato
Hg	Mercúrio
HCl	Ácido clorídrico
H ₂ S	Gás sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
J	Poço de monitoramento a jusante do maciço do lixão
K	Potássio
L	Amostra de lixiviado coletado nos lisímetros de sucção e filtrado em filtro 0,45 µm
L1, L2 ... Ln	Poços de monitoramento
Lig	Lignina
LS	Amostra de lixiviado suspenso coletado da superfície livre do poço cacimba
M	Poço de monitoramento a montante do maciço do lixão
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MO	Matéria orgânica

N	Amostra bruta de lixiviado coletado nos lisímetros de sucção
Na	Sódio
NAT	Nitrogênio amoniacal total
NBR	Norma brasileira
NH ₄	Amônio
NH ₄ HCO ₃	Bicarbonato de amônio
Ni	Níquel
NO ₂	Nitrito
NO ₃	Nitrato
N _{org}	Nitrogênio orgânico
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl
O ₂	Gás oxigênio
OD	Oxigênio dissolvido
OG	Óleos e graxas
ORP	Potencial de óxido-redução
P	Fósforo
P1, P2 ... Pn	Pontos de amostragem de água superficial no córrego São José
Pb	Chumbo
PET	Poli tereftalato de etileno
pH	Potencial hidrogeniônico
PM	Poço de monitoramento
PMSC	Prefeitura Municipal de São Carlos
PO ₄	Fosfato
PVC	Policloreto de vinila
RSU	Resíduos sólidos urbanos
S	Enxofre
S ²⁻	Sulfeto
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SO ₄	Sulfato
SP	São Paulo
Sb	Antimônio
SVOC	Compostos orgânicos semi-voláteis
Se	Selênio
STV	Sólidos totais voláteis
SSV	Sólidos suspensos voláteis
ST	Sólidos totais
STF	Sólidos totais fixos
SB	Amostra sólida deformada da base do lixão
SiO ₂	Sílica
SH	Substâncias húmicas
T	Temperatura
Ti	Titânio
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
VOC	Compostos orgânicos voláteis
VL	Valor limite
VMP	Valor máximo permitido
W	Teor de umidade
XOC	Compostos orgânicos xenobióticos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zonas redox formadas em um aquífero originalmente aeróbio impactado por um depósito de resíduos em fase metanogênica e a distribuição das espécies químicas sensíveis às alterações nas condições redox	25
Figura 2 – Localização do lixão Santa Madalena	35
Figura 3 – Mapa hidrográfico e geológico regional	37
Figura 4 – Esquema de deposição dos resíduos no lixão Santa Madalena de 1980 a 1996	39
Figura 5 – Vista geral da área do lixão Santa Madalena, onde as curvas de nível e a cerca elétrica podem ser identificadas. A plantação de goiaba e a criação de búfalos também podem ser avistadas	41
Figura 6 – Localização dos poços de monitoramento no lixão desativado de São Carlos	49
Figura 7 – Resumo esquemático das etapas de trabalhos em campo e em laboratório.....	51
Figura 8 – Posição da estação experimental e dos poços de monitoramento amostrados no lixão Santa Madalena.....	52
Figura 9 – Croqui da estação experimental instalada no maciço do lixão desativado de São Carlos .	53
Figura 10 – Escavação manual do poço cacimba dentro do lixão desativado de São Carlos	55
Figura 11 – Resíduos com escrita legível do material aterrado no lixão desativado de São Carlos....	56
Figura 12 – Amostra indeformada do solo de cobertura do lixão desativado.....	57
Figura 13 – Amostras sólidas deformadas (ASD) e de amostras sólidas aterradas (ASA) do maciço do lixão desativado de São Carlos.....	58
Figura 14 – Amostras do material líquido encontrado no maciço do lixão desativado de São Carlos .	59
Figura 15 – Instalação do poço de monitoramento PM29 na porção de resíduos do lixão desativado	60
Figura 16 – Esquema prático de instalação e funcionamento do lisímetro para coleta de amostras líquidas. (A) Lisímetro sujeito a pressão atmosférica, antes da coleta (B) Aplicação de pressão negativa em todo o sistema (C) A pressão negativa succiona a amostra do meio para o interior do lisímetro através da cápsula porosa (D) A mangueira de ar é desconectada da bomba a vácuo, permitindo a entrada da pressão atmosférica no sistema, a qual força o escoamento da amostra pela mangueira de coleta até o frasco coletor, ainda sujeito a pressões negativas.....	62
Figura 17 – Processo de descontaminação dos lisímetros de sucção	63
Figura 18 – Instalação dos lisímetros de sucção na estação experimental do lixão desativado	65
Figura 19 – Amostragem de lixiviado na estação experimental do lixão desativado de São Carlos ...	68
Figura 20 – Filtração do lixiviado à vácuo em filtro de 0,45 µm, logo após a coleta	69
Figura 21 – Amostragem de água subterrânea na área do lixão desativado	71
Figura 22 – Base do diagrama de Stiff, representação gráfica da composição hidroquímica de uma amostra.....	76
Figura 23 – Estrutura aproximada do perfil escavado no maciço do lixão desativado de São Carlos .	80
Figura 24 – Curvas de distribuição granulométrica dos solos usados nas camadas de cobertura do lixão desativado de São Carlos	81

Figura 25 – Comparação da composição gravimétrica de amostras de resíduos aterrados nas camadas de 1996 e 1985, calculada por Abreu (2013) e da composição gravimétrica de amostras de resíduos de São Carlos antes do aterramento, calculada por Gomes (1989). Todas as amostras são amostras de resíduos do lixão Santa Madalena	82
Figura 26 – Chorume imóvel: líquido estagnado encontrado sobre os resíduos.	83
Figura 27 – Amostras do material aterrado no maciço de lixão desativado e as respectivas profundidades de onde foram coletadas	84
Figura 28 – Resultados das análises químicas do extrato de solubilização das amostras de solo e de resíduos aterrados no maciço do lixão desativado.	90
Figura 29 – Qualidade do chorume imóvel encontrado no maciço do lixão desativado.	92
Figura 30 – Detalhe da coloração das amostras não filtradas (N) e filtradas (L) do lixiviado coletado nos lisímetros de sucção em 21/02/2013.....	101
Figura 31 – Quantidade de filtros de acetato de celulose (0,45 µm) usados para filtração de 200 ml de lixiviado do maciço do lixão desativado de São Carlos: 1 filtro para L1 referente a profundidade 0,8 m; 5 filtros para L2 referente a profundidade 1,3 m; 1 filtro para L3 referente a profundidade 1,8 m; 2 filtros para L4 referente a profundidade 2,3 m; 2 filtros para L5 referente a profundidade 2,8 m; 3 filtros para L6 referente a profundidade 3,3 m	101
Figura 32 – Composição hidroquímica do lixiviado do lixão Santa Madalena em diagramas de Stiff	104
Figura 33 – Qualidade do lixiviado no maciço do lixão desativado em perspectiva temporal e espacial em profundidade	106
Figura 34 – Sistema CO ₂ -H ₂ O: Especificação relativa (%) de ácido carbônico H ₂ CO ₃ , bicarbonato HCO ₃ ⁻ e carbonato CO ₃ ²⁻ na água	111
Figura 35 – Relação entre os resultados de carbono orgânico dissolvido e demanda química de oxigênio dissolvida	113
Figura 36 – Relação entre DBO ₅ e DQO no lixiviado do lixão desativado de São Carlos	114
Figura 37 – Variação de DQO, pH e composição de gases nas diferentes etapas de estabilização de resíduos dispostos em aterros: (I) ajustamento inicial; (II) transição; (III) formação de ácidos; (IV) metanogênica estável; (V) regressiva	122
Figura 38 – Esquema simplificado do perfil construtivo dos poços de monitoramento avaliados nesta pesquisa, com os respectivos níveis da água (N.A.) logo após a perfuração e as respectivas distâncias aproximadas em relação ao PM03. PM03 está a montante do maciço (fica a 25 m do maciço), PM29 está dentro do maciço, PM17 (fica a 34 m do maciço), PM19 (fica a 135 m do maciço) e PM 23 (fica a 140 m do maciço) estão a jusante do maciço.	124
Figura 39 – Resultados da qualidade das águas subterrâneas nos poços a montante (PM03), dentro (PM29) e a jusante (PM17, PM19, PM23) do maciço do lixão desativado de São Carlos.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais reações redox ocorrentes nas águas subterrâneas impactadas por lixiviado ...	25
Tabela 2 – Critérios para identificação de zonas redox em águas subterrâneas impactadas por lixiviados	26
Tabela 3 – Principais processos geoquímicos que controlam o comportamento dos macrocomponentes iônicos em águas subterrâneas impactadas por lixiviados	27
Tabela 4 – Qualidade do chorume produzido experimentalmente a partir de amostras de resíduos do lixão de São Carlos em 1983	43
Tabela 5 – Qualidade dos resíduos sólidos aterrados de São Carlos na época de operação do lixão Santa Madalena	44
Tabela 6 – Qualidade da água do córrego São José, em pontos a montante e a jusante do lançamento dos efluentes do lixão Santa Madalena, dados de 1990 e 1991 quando o lixão estava em operação	45
Tabela 7 – Qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área do lixão Santa Madalena, dados de 1993 e 1994 quando o lixão estava em operação	45
Tabela 8 – Faixa de valores da qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área do lixão Santa Madalena, dados de 1996 quando o lixão estava em processo de encerramento	46
Tabela 9 – Qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área do lixão Santa Madalena, dados de 2004 e 2005 quando o lixão estava encerrado	47
Tabela 10 – Identificação dos poços de monitoramento existentes no lixão Santa Madalena	48
Tabela 11 – Identificação das amostras coletadas durante a escavação do poço cacimba	57
Tabela 12 – Identificação das amostras coletadas durante a perfuração do poço de monitoramento	61
Tabela 13 – Dados da descontaminação e do teste de vácuo nos lisímetros de sucção	64
Tabela 14 – Identificação das amostras coletadas durante a instalação dos lisímetros	66
Tabela 15– Identificação das amostras coletadas no monitoramento da estação experimental	67
Tabela 16 – Variáveis medidas em campo durante a amostragem de lixiviado do lixão desativado...	70
Tabela 17 – Dados meteorológicos do período de instalação e de monitoramento do experimento...	70
Tabela 18 – Variáveis medidas em campo durante a amostragem de água subterrânea	71
Tabela 19 – Identificação das amostras coletadas no monitoramento dos poços de monitoramento .	72
Tabela 20 – Variáveis analisadas em cada tipo de amostra	73
Tabela 21 – Métodos usados para determinação das variáveis químicas	74
Tabela 22 – Características físicas, frações inorgânicas (STF) e frações orgânicas (STV) remanescentes no maciço do lixão desativado, a partir das amostras sólidas do maciço.....	85
Tabela 23 – Concentrações de metais pesados nos extratos de solubilização obtidos a partir das amostras sólidas do maciço do lixão desativado	87
Tabela 24 – Concentrações de íons nos extratos de solubilização obtidos a partir das amostras sólidas do maciço do lixão desativado	88
Tabela 25 – Frações do NTK (divididas em nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal) e razão DBO/DQO do chorume imóvel aterrado no maciço do lixão desativado	95

Tabela 26 – Qualidade do lençol de lixiviado suspenso do lixão desativado	97
Tabela 27 – Qualidade do lençol de lixiviado suspenso do lixão desativado	99
Tabela 28 – Temperatura ambiente e das amostras de lixiviado do lixão desativado de São Carlos	102
Tabela 29 – Resultados da solubilização da areia usada na instalação dos lisímetros	103
Tabela 30 – Concentrações de metais encontradas no solo de cobertura do aterro de São Carlos .	118
Tabela 31 – Qualidade do lixiviado da camada mais profunda avaliada no lixão desativado	122
Tabela 32 – Comparação da qualidade do solo da base do lixão desativado com os valores do Anexo G da NBR 10.004 (ANBT, 2004), com a qualidade do solo de cobertura (branco) e com as médias dos resultados do lixiviado do último lisímetro L6.	125
Tabela 33 – Comparação da qualidade das águas subterrâneas do poço dentro do maciço PM29 com os valores limites e com a qualidade do lixiviado L6 da camada mais antiga de resíduos	130
Tabela 34 – Análise dos íons para previsão das zonas redox nas águas subterrâneas do lixão desativado de São Carlos.....	133

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Siglas e Abreviaturas	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Sumário	xv
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	21
2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. ESTUDOS HIDROGEOQUÍMICOS EM DEPÓSITOS DE RESÍDUOS	24
3.1.1. Principais componentes biogeoquímicos de interesse ambiental para avaliação de depósitos de resíduos	26
3.2. LIXÕES E ATERROS CONTROLADOS	29
3.3. ENCERRAMENTO E ATIVIDADES PÓS-ENCERRAMENTO	30
4. ÁREA DE ESTUDO.....	35
4.1. CICLO DE VIDA DO LIXÃO SANTA MADALENA	36
4.1.1. Características de instalação	36
4.1.2. Características de operação	37
4.1.3. Características de encerramento.....	40
4.1.4. Cuidados pós-encerramento.....	40
4.2. HISTÓRICO DOS ESTUDOS NO LIXÃO SANTA MADALENA.....	42
5. MATERIAL E MÉTODOS	51
5.1. PREÂMBULO	51
5.2. INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL	52

5.2.1.	Instalação da estação experimental	53
5.2.2.	Escavação e revestimento do poço cacimba	54
5.2.3.	Amostragem e análises do material escavado	56
5.3.	INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO	59
5.3.1.	Poço de monitoramento	59
5.3.2.	Verificação dos lisímetros de sucção	61
5.3.3.	Instalação dos lisímetros de sucção e acabamento do poço cacimba	64
5.4.	MONITORAMENTO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL	66
5.4.1.	Procedimento de amostragem nos lisímetros de sucção	68
5.4.2.	Filtração das amostras in situ	69
5.4.3.	Obtenção de variáveis in situ	69
5.5.	DADOS METEOROLÓGICOS	70
5.6.	CONTROLE DOS POÇOS DE MONITORAMENTO	71
5.6.1.	Procedimento de amostragem nos poços de monitoramento	71
5.7.	ANÁLISES LABORATORIAIS	72
5.8.	TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	75
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO DE RESÍDUOS DO LIXÃO DESATIVADO	79
6.1.1.	Características gerais do maciço de resíduo	80
6.1.2.	Composição do conteúdo aterrado	81
6.1.3.	Qualidade e classificação do conteúdo aterrado	83
6.2.	CARACTERÍSTICAS DO LENÇOL DE LIXIVIADO SUSPENSO	96
6.3.	QUALIDADE DO LIXIVIADO EM CAMADAS DE DIFERENTES IDADES	100
6.4.	QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	123
6.5.	PREVISÃO DAS ZONAS REDOX NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	131
7.	CONCLUSÕES	135
8.	RECOMENDAÇÕES	139
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
	APÊNDICE A – Matriz de correlação de Pearson para os resultados de qualidade dos resíduos aterrados	152

APÊNDICE B – Matriz de correlação de Pearson para os resultados de qualidade do chorume imóvel

APÊNDICE C – Matriz de correlação de Pearson para os resultados de qualidade do lixiviado.....	154
APÊNDICE D – Detalhes sobre as análises físico-químicas do lixiviado	155
APÊNDICE E – Resultados das análises físico-químicas	157
APÊNDICE F – Resultados da modelagem de especiação química, a partir do software PHREEQC 165	
APÊNDICE G – Resultados da análise físico-química da amostra de água da nascente do fim do talude do lixão desativado de São Carlos	165
ANEXO 1 – Perfil construtivo do poço de monitoramento PM29, instalado dentro do maciço de resíduos do lixão Santa Madalena	186
ANEXO 2 – Linhas do levantamento geofísico e mapas de resistividade na área do lixão santa Madalena – São Carlos/SP	187
ANEXO 3 – Mapa potenciométrico do lixão santa Madalena – São Carlos/SP de julho e de dezembro de 2010, respectivamente	195

1. INTRODUÇÃO

Existem milhares de instalações de destinação final de resíduos em situação inadequada espalhadas pelo Brasil e pelo mundo. Este cenário é resultado de falhas nas políticas de gestão de resíduos ou inexistência das mesmas. No Brasil, onde a Política Nacional de Resíduos Sólidos foi aprovada recentemente, existem casos de aterros sanitários relacionados à contaminação das águas e de muitos municípios que ainda depositam seus resíduos em lixões e aterros controlados.

Lixões e aterros controlados chamam atenção de gestores e pesquisadores por serem fontes potenciais de poluição das águas. Entretanto, dados sobre estes depósitos, em operação ou desativados, são escassos, principalmente devido à falta de dispositivos de controle ambiental (retenção, drenagem e tratamento de efluentes), o que dificulta a amostragem e a coleta de informações para pesquisas. A maior parte dos estudos realizados nestes tipos de depósitos avalia sua interferência sobre a qualidade dos recursos hídricos, através da estimativa da pluma de contaminação e do monitoramento das águas superficiais e subterrâneas em sua área de influência. Os resultados de qualidade das águas, quando obtidos de instalações antigas (depósitos encerrados há mais de 10 anos), induzem os gestores a pensar que a decomposição dos resíduos foi estabilizada e que os efluentes não são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública. Conclusões deste tipo, baseadas em métodos de avaliação pouco precisos e não padronizados, resultaram no abandono equivocado de muitos lixões e aterros controlados desativados.

Características sobre os depósitos de resíduos desativados, como informações sobre os procedimentos operacionais e sobre a qualidade dos resíduos aterrados, do solo de cobertura, são dados importantes, mas raros na literatura. Estas informações deveriam determinar quando o monitoramento dessas áreas pode ser descontinuado e não o período de 20 a 30 anos após o encerramento estabelecido em legislação.

Diante dessas constatações e visando preencher lacunas de informações sobre lixões e aterros controlados, numerosos no Brasil, este trabalho mostra as

características do maciço, do lixiviado, das águas subterrâneas, bem como o potencial remanescente de contaminação do lixão desativado de São Carlos/SP, operado entre 1980 e 1996. O tema é bastante conveniente no contexto atual, visto que a Política Nacional de Resíduos Sólidos prevê o encerramento e a recuperação destes depósitos irregulares até agosto de 2014.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar a mobilização de poluentes no maciço de resíduos e o potencial remanescente de contaminação do lixão desativado de São Carlos/SP.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revelar a qualidade do conteúdo aterrado nas camadas de resíduos de diferentes idades de deposição;
- Classificar os resíduos aterrados segundo a NBR 10004 para determinar se o conteúdo do lixão desativado está inerte;
- Verificar a qualidade do lixiviado (não diluído) no maciço de resíduos de um lixão encerrado há 18 anos;
- Determinar a fase de decomposição em que se encontra o lixão;
- Avaliar se a qualidade do lixiviado está em conformidade com os padrões de lançamento de efluentes;
- Fazer uma previsão sobre os possíveis ambientes geoquímicos nas águas subterrâneas da região;
- Avaliar a possibilidade da interrupção do monitoramento da área.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Depósitos de resíduos sólidos urbanos (RSU), seja lixão, aterro controlado ou aterro sanitário, são áreas bastante visadas para estudos. Isto acontece porque a comunidade científica comprovou que seus efluentes podem degradar a qualidade ambiental, ao liberar elevadas concentrações de diferentes espécies químicas no meio e elementos que não eram naturais deste ambiente antes da deposição dos resíduos. Em geral, as duas principais linhas de pesquisa nestes depósitos são direcionadas à avaliação de impactos ambientais (caracterização dos resíduos e dos efluentes; delimitação de pluma de contaminação; diagnóstico ambiental para constatação de poluição de ar, água e solo; métodos de contenção e tratamento de efluentes; variação entre as técnicas e os materiais usados durante a instalação e operação de aterros) e à avaliação de aspectos econômicos (caracterização socioeconômica; desvalorização da área; produção de energia; créditos de carbono; aumento da vida útil do aterro; produção de materiais especiais para aterros sanitários; usos futuros da área).

Dentro da primeira linha de pesquisa, a grande maioria dos estudos é destinada à caracterização do lixiviado de aterros sanitários e ao monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Como resultado, existem muitos dados sobre a qualidade do lixiviado (CHIAN; DEWALLE, 1976, 1977 apud QASIM; CHIANG, 1994; FARQUHAR, 1989; EHRIG, 1983, 1989; TCHOBANOGLIOUS et al., 1993; KJELDSSEN et al., 2002; BAUN; CHRISTENSEN, 2004; BAUN et al., 2004; ÖMAN; JUNESTEDT, 2008; SOUTO; POVINELLI, 2011) e suas alterações ao longo do tempo, os quais serviram para definir as diferentes fases do aterro (FARQUHAR; ROVERS, 1973; REES, 1980; POHLAND; DERTIEN; GHOSH, 1983 apud POHLAND; HARPER, 1985; MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995; COTRIM, 1997 apud BIDONE; POVINELLI, 1999; REICHERT, 1999; FANIN; ROBERTS, 2006). Também existem muitos trabalhos que relatam casos de contaminação das águas por depósitos de resíduos sólidos urbanos (FATTA et al., 1999; LIU et al., 2007; SINGH et al., 2008; LUDVIGSEN

et al., 1999; PIAI et al., 2006; OLIVEIRA; PASQUAL, 2004; COELHO et al., 2002; ROCHA; HORBE, 2006; BESERRA et al., 2007; LOPES, 2007). Por outro lado, estudos hidrogeoquímicos em depósitos de resíduos são escassos (KEHEW, 2001).

3.1. ESTUDOS HIDROGEOQUÍMICOS EM DEPÓSITOS DE RESÍDUOS

Os estudos hidrogeoquímicos em depósitos de resíduos tentam interpretar a interação do lixiviado com a água subterrânea e o meio geológico. A partir desta avaliação, é possível identificar diferentes ambientes geoquímicos nos aquíferos impactados por lixiviados, bem como delimitar a pluma de contaminação. De maneira geral, existem três principais ambientes geoquímicos nas áreas de deposição de resíduos (FETTER, 1999):

(1) a montante do aterro, o aquífero normalmente apresenta condições aeróbias;

(2) abaixo do aterro e em suas proximidades imediatas, o aquífero apresenta condições anaeróbias devido à oxidação da matéria orgânica que consome oxigênio;

(3) a jusante do aterro, diferentes ambientes geoquímicos são formados ao longo da pluma de contaminação, os quais são alterados gradativamente até atingir as condições aeróbias novamente.

Através de um estudo qualitativo, Christensen et al. (2001) esquematizaram uma sequência de zonas redox – metanogênica, sulfato-redutora, ferro-redutora, manganês-redutora, desnitrificação e aeróbia – a partir do lançamento do lixiviado do maciço para as águas subterrâneas até a atenuação total da pluma de contaminação (Figura 1). Os autores também indicaram o comportamento dos elementos S, Fe, Mn, NO_3 , O_2 , SO_4 e carbono orgânico dissolvido (COD) nas águas subterrâneas ao longo dessas zonas redox. Essas zonas foram sugeridas por Baedecker e Back (1979a, 1979b) e Nicholson et al. (1983), as quais foram sendo confirmadas por outros pesquisadores (LYNGKILDE; CHRISTENSEN, 1992a; BJERG et al., 2003 etc.). Adicionalmente, Christensen et al. (2001) também indicaram as principais reações redox que ocorrem na água subterrânea impactada por lixiviado (Tabela 1). A identificação destas zonas e destas reações redox foi fundamental para direcionar os estudos hidrogeoquímicos realizados em depósitos de resíduos.

3. Revisão Bibliográfica

Figura 1 – Zonas redox formadas em um aquífero originalmente aeróbio impactado por um depósito de resíduos em fase metanogênica e a distribuição das espécies químicas sensíveis às alterações nas condições redox (Fonte: CHRISTENSEN et al., 2001 apud ALVES, 2012).

Tabela 1 – Principais reações redox ocorrentes nas águas subterrâneas impactadas por lixiviado (Fonte: adaptado de CHRISTENSEN et al., 2001)

Processos redox	Reações
Metanogênese/Mineralização fermentativa da MO	$2\text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
Redução do sulfato/ Oxição da MO	$2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{HS}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
Redução do ferro/ Oxição da MO	$\text{CH}_2\text{O} + 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 8\text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{Fe}^{2+} + 11\text{H}_2\text{O}$
Redução do manganês/ Oxição da MO	$\text{CH}_2\text{O} + 2\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{Mn}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$
Desnitrificação/ Oxição da MO	$5\text{CH}_2\text{O} + 4\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{N}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$
Respiração aeróbia	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Redução do CO_2	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
Oxição do amônio	$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$
Oxição do metano	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$

Nota: MO = matéria orgânica, CH_2O = matéria orgânica dissolvida

Os parâmetros de qualidade analisados nas amostras de solo, de água subterrânea e de lixiviado são dados importantes para a identificação das zonas redox. Lyngkilde e Christensen (1992a) desenvolveram critérios (Tabela 2) para identificação destas zonas com base na composição das águas subterrâneas do Aterro Vejen, na Dinamarca. Porém, estes critérios podem não ser coerentes para o zoneamento geoquímico de outros aquíferos, como foi verificado por Bjerg et al. (1995), que avaliou outro aterro dinamarquês.

Tabela 2 – Critérios para identificação de zonas redox em águas subterrâneas impactadas por lixiviados (Fonte: LYNKGILDE; CHRISTENSEN, 1992 apud ALVES, 2012)

Parâmetro	Aeróbia	Desnitrificação	Manganês redutora	Ferro redutora	Sulfato redutora	Metanogênica
OD	>1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
NO ₃	-	-	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
NO ₂	<0,1	-	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
NH ₄	<0,1	-	-	-	-	-
Mn(II)	<0,2	<0,2	>0,2	-	-	-
Fe(III)	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	-	-
SO ₄	-	-	-	-	-	<40,0
S ₂	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	>0,2	-
CH ₄	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	>1,0

Nota: Valores em mg.L⁻¹

Os modelos representados na Figura 1 e na Tabela 2 resumem as condições de aquíferos impactados por um depósito de resíduos na fase metanogênica (condição da área de estudo deste trabalho), quando a população de microrganismos do aquífero já está equilibrada com a carga orgânica e inorgânica do lixiviado (ALVES, 2012).

3.1.1. Principais componentes biogeoquímicos de interesse ambiental para avaliação de depósitos de resíduos

Os principais componentes biogeoquímicos das águas subterrâneas impactadas por lixiviados são componentes microbiológicos, matéria orgânica dissolvida, macrocomponentes iônicos, metais pesados e compostos orgânicos xenobióticos (CHRISTENSEN et al., 2001).

1. Componentes microbiológicos: Os microrganismos de aquíferos impactados por lixiviados são diferentes dos microrganismos encontrados em aquíferos não poluídos, devido à presença de espécies químicas reduzidas e às altas concentrações

3. Revisão Bibliográfica

de matéria orgânica no lixiviado (LUDVIGSEN et al., 1999, ROLING et al., 2001; BJERG et al., 2003). A obtenção de dados sobre os componentes microbiológicos é complexa, uma vez que os métodos de análises disponíveis detectam menos de 1% do total da comunidade microbiológica existente nos aquíferos (ALVES, 2012);

2. Matéria orgânica (MO) dissolvida: expressa pelas variáveis COT (carbono orgânico total), COD (carbono orgânico dissolvido), DQO (demanda química de oxigênio) e DBO₅ (demanda bioquímica de oxigênio). A diluição, dispersão e degradação são os principais processos que regulam a atenuação das concentrações de MO dissolvida no aquífero (CHRISTENSEN, 2001);

3. Macrocomponentes iônicos: os íons maiores envolvem as espécies químicas encontradas em elevadas concentrações na água subterrânea (cloreto Cl⁻, bicarbonato HCO₃⁻, sulfato SO₄²⁻, cálcio Ca, magnésio Mg, potássio K, sódio Na, amônio NH₄⁺, ferro Fe e manganês Mn). A maioria desses elementos não possui elevada toxicidade – com exceção do íon amônio que é tóxico para ecossistemas aquáticos (CLÉMENT; MERLIN, 1995; ERSKINE, 2000; CHRISTENSEN, 2001) – mas controlam os ambientes geoquímicos, como contribuem para a atenuação de alguns metais pesados. Os principais processos de atenuação dos íons maiores são diluição, dispersão, processos redox, troca iônica, precipitação, complexação com MO e dissolução de sólidos do meio geológico (CHRISTENSEN et al., 2001). A Tabela 3 resume os prováveis processos geoquímicos de maior importância que controlam o comportamento dos íons maiores nas águas subterrâneas impactadas por lixiviados;

Tabela 3 – Principais processos geoquímicos que controlam o comportamento dos macrocomponentes iônicos em águas subterrâneas impactadas por lixiviados (Fonte: CHRISTENSEN et al., 2001 apud ALVES, 2012).

Processos	Ânions			Cátions						
	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Fe ²⁺ Fe ³⁺	Mn ²⁺ Mn ⁴⁺
Diluição	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dispersão										
Complexação	-	+	(+)	+	+	-	-	-	(+)	(+)
Processos redox	-	-	+	-	-	-	-	(+)	+	+
Troca iônica	-	-	(+)	+	+	+	+	+	+	+
Precipitação	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+
Dissolução										

+ significa importante; (+) significa usualmente de menor importância; - significa não importante

4. Metais pesados: as concentrações dos metais pesados – As, Ag, Cd, Pb, Co, Cr, Ni, Cu, Zn, Hg – geralmente são baixas, parte porque eles estão sujeitos a forte

atenuação por sorção e precipitação na fase metanogênica do aterro (ERSKINE, 2000; CHRISTENSEN et al., 2001). A maior preocupação é a complexação com a MO, a qual aumenta a mobilidade dos metais pesados. A sorção dos metais ocorre em minerais argilosos, matéria orgânica e óxidos de ferro e é controlada pelo pH do meio. A atenuação dos metais pesados por precipitação ocorre principalmente em sulfetos e carbonatos, ainda que fosfatos e hidróxidos possam contribuir para a redução da solubilidade. Nesse sentido, a maior parte dos metais pesados não passa pela zona sulfato-redutora, porque eles estarão em baixas concentrações e quaisquer concentrações de sulfeto seriam suficientes para a precipitação dos metais pesados (CHRISTENSEN et al., 2001).

5. Compostos orgânicos xenobióticos (XOC): fazem parte da relação de compostos orgânicos voláteis (VOC) e semi-voláteis (SVOC) que incluem hidrocarbonetos aromáticos voláteis, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, metanos, etanos e etenos clorados, fenóis, pesticidas, bifenilas policloradas (PCB), alguns produtos farmacêuticos e hormônios (CHRISTENSEN et al., 2001; ÖMAN; JUNESTEDT, 2008; NASCIMENTO-FILHO et al., 2001; BARNES et al., 2004; ZHANG et al., 2009; KAMATA et al., 2011). Estes componentes possuem elevada toxicidade, ainda que eles representem uma pequena porcentagem do COD na água impactada por lixiviado, em concentrações da ordem de partes por bilhão (ALVES, 2012). A atenuação das concentrações de XOC em plumas ocorre por diluição, sorção e degradação. Christensen et al. (2001) destacam que as zonas redox com maior quantidade de receptores de elétrons (SO_4 , Fe, NO_3) são as mais favoráveis para a oxidação destes compostos orgânicos.

Ressalta-se que esses cinco grupos de componentes deveriam ser incluídos nos planos de monitoramento durante todas as fases de um depósito de resíduos, incluindo análises antes da instalação, durante a operação e nos cuidados após o encerramento. Observa-se que isto nem sempre acontece em todas as instalações de destinação final de resíduos, principalmente nas fases de encerramento e pós-encerramento destas instalações. Alves e Bertolo (2012) avaliaram alguns estudos hidrogeoquímicos em depósitos de resíduos e constataram que qualquer instalação de disposição final de resíduos sobre o solo está sujeita a riscos de contaminação dos recursos hídricos. Casos de contaminação por aterros sanitários acontecem provavelmente por falhas na construção (BJERG et al., 2003; CHRISTENSON; COZZARELLI, 2003). Casos relacionados a lixões e aterros controlados já são mais

frequentes, uma vez que a falta de impermeabilização do maciço de resíduos ocasiona o constante lançamento de poluentes para o meio ambiente. Portanto, o pior cenário é a falta de monitoramento de lixões e aterros controlados, numerosos no Brasil e no mundo.

3.2. LIXÕES E ATERROS CONTROLADOS

Existem milhares de lixões e aterros controlados espalhados pelo Brasil e pelo mundo que oferecem riscos de danos ao meio ambiente e à saúde pública. Essas formas impróprias de disposição final de resíduos existem principalmente devido à grande disponibilidade de áreas e aos baixos custos de operação (JOHANNESSEN; BOYER, 1999). Segundo as três últimas Pesquisas Nacionais de Saneamento Básico, 98% (até 1998), 95% (até 2000) e 73% (até 2008) dos municípios brasileiros declararam dispor seus resíduos em depósitos de resíduos ambientalmente inadequados (IBGE, 2002, 2010). A queda do percentual desses depósitos impróprios revela um sinal de progresso na gestão de resíduos ao longo dos anos, mas também desperta atenção para outro problema: o aumento da quantidade de lixões abandonados.

O número de lixões e aterros controlados encerrados no Brasil é desconhecido. Estes depósitos de resíduos irregulares, em sua maioria, não dispõem de planos de recuperação, como também não são devidamente monitorados. Esta falta de cuidados após o encerramento permite constante produção e lançamento de lixiviado (principal agente poluidor dos solos e das águas), que pode ser transportado para mananciais superficiais ou subterrâneos. Portanto, os depósitos de resíduos desativados transformaram-se em fontes potencialmente poluidoras.

Desde 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos passou a exigir que o encerramento dessas instalações impróprias de disposição final de resíduos, desde que seja feito com aplicação de medidas saneadoras (BRASIL, 2010a, 2010b). A princípio, esses passivos ambientais passam por uma investigação ambiental detalhada que incluem uma avaliação de risco à saúde humana. Porém, na maioria das vezes, os diagnósticos são feitos baseados em métodos indiretos, como através da avaliação da qualidade das águas de certa área de influência. Isto acontece, principalmente, devido à falta de estrutura e de dispositivos de controle ambiental

(contenção, drenagem e tratamento de efluentes) em lixões e aterros controlados, que dificulta a amostragem e a coleta de informações para diagnósticos e projetos. Por isso, dados sobre lixões e aterros controlados brasileiros, em operação ou desativados, são escassos e as investigações ambientais são realizadas sem a devida avaliação do estado e da qualidade dos resíduos, do lixiviado, do solo de cobertura e das características de deposição de resíduos.

3.3. ENCERRAMENTO E ATIVIDADES PÓS-ENCERRAMENTO

Questões sobre encerramento e pós-encerramento de depósitos de resíduos são pouco discutidas entre gestores, pesquisadores e regulamentadores. Um estudo da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos em conjunto com a Fundação Getúlio Vargas (ABETRE, 2009) confirmou que essas etapas da gestão são frequentemente subestimadas ou até mesmo desconsideradas nos orçamentos públicos, resultando na insuficiência de recursos financeiros que serviriam para assegurar os cuidados mínimos destes depósitos de resíduos desativados.

No Brasil, as normas NBR 8.419 (ABNT, 1992), NBR 13.896 (ABNT, 1997) e NBR 15.849 (ABNT, 2010) exigem um plano de encerramento e cuidados posteriores para aterros sanitários. Entretanto, estes tópicos são abordados de maneira pouco criteriosa nas respectivas normas, sem diretrizes e sem valores de referência, possibilitando que gestores escolham ações e técnicas que nem sempre são eficazes para mitigar os impactos negativos desses depósitos de resíduos. As principais exigências dessas normas são:

- i. Apresentação do plano de encerramento do aterro e cuidados posteriores;
- ii. Estimativa da vida útil do aterro, da qualidade e da quantidade de resíduos aterrados;
- iii. Projeto de cobertura final do aterro para minimizar/evitar o lançamento de efluentes líquidos e gasosos do aterro para o meio;
- iv. Monitoramento de erosão e da qualidade dos recursos hídricos da região;
- v. Manutenção dos sistemas de tratamento dos efluentes líquidos e gasosos até o término de sua geração ou até que se atenda aos padrões legais de emissão;
- vi. Possível isolamento local;
- vii. Indicação de uso futuro da área.

Sobre os prazos solicitados, os aterros sanitários devem ser projetados para ter uma vida útil de no mínimo 10 anos (NBR 13.896) ou 15 anos (NBR 15.849), o plano de encerramento deve ser executado até no máximo 6 meses após a interrupção da disposição de resíduos e a qualidade das águas subterrâneas em sua área de influência deve ser monitorada por 10 (NBR 15.849) ou 20 anos (NBR 13.896) após o encerramento do aterro. Esses prazos são flexíveis, podendo ser diminuído ou estendido, quando comprovada a necessidade. Por outro lado, essas exigências e prazos não se aplicam para lixões e aterros controlados. Logo o encerramento desses depósitos inadequados geralmente é feito sem critérios, realizando-se apenas a interrupção da disposição de resíduos no local, fechamento e abandono da área, que é o caso do lixão Santa Madalena (área de estudo deste trabalho).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010a) e regulamentada pelo Decreto Federal nº 7.404 (BRASIL, 2010b), passou a exigir a eliminação e a recuperação de depósitos de resíduos inadequados no Plano Nacional de Resíduos Sólidos e nos Planos Estaduais de Resíduos Sólidos, até 03 de agosto de 2014. Como esta meta não foi cumprida, principalmente por *déficit* de recursos financeiros, novos prazos foram estabelecidos e agora as datas foram diferenciadas conforme o porte populacional dos municípios, acreditando que os maiores recebem mais recursos, logo devem atender a meta em um prazo mais curto de tempo: (1) População > 100 mil habitantes – até dezembro/2016; (2) População entre 50 e 100 mil habitantes – até dezembro/2017; (3) População < 50 mil habitantes – até dezembro/2018. Segundo o último Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2013), o total dos investimentos necessários para se alcançar 100% de destinação final adequada para os RSU, até o ano de 2018, é cerca de 11,4 bilhões de reais, valor não muito significativo frente ao PIB nacional de 2012. Foi previsto um montante adicional para a complementação da expansão da destinação dos RSU, de 2019 até 2033 (0,73 bilhão). Para a reposição da destinação dos resíduos sólidos, os investimentos previstos são bem menores – 1,7 bilhões até 2018, 1,87 bilhões entre 2019 e 2023 e 3,9 bilhões entre 2024 e 2033.

A CETESB antecipou a Política Estadual de Resíduos Sólidos, através da Lei Estadual nº 12.300 (SÃO PAULO, 2006) e do Decreto Estadual nº 54.645 (SÃO PAULO, 2009a), a qual já preconizava como meta a erradicação de lixões, aterros controlados, bota-foras e demais destinações inadequadas no estado, mas sem a determinação de prazos. A agência ainda criou um roteiro para projeto de

encerramento e recuperação de lixões, exigido no processo de licenciamento ambiental desses depósitos (CETESB, 2014b). Como requisitos mínimos são exigidos:

- i. Levantamento topográfico, investigação geológica, geotécnica e hidrogeológica;
- ii. Representação em planta planialtimétrica, em escala não inferior a 1:2.000, do uso do solo, das águas subterrâneas e das águas superficiais num raio mínimo de 200 m;
- iii. Reconformação geométrica do maciço e proposição de cobertura final;
- iv. Sistema de drenagem, acumulação e tratamento de líquidos percolados;
- v. Sistema de drenagem de águas pluviais;
- vi. Sistema de drenagem de gases;
- vii. Plano de monitoramento geotécnico, de gases e das águas superficiais e subterrâneas na região do aterro;
- viii. Cobertura vegetal;
- ix. Isolamento físico e visual da área do aterro;
- x. Uso futuro da área incluindo, preferencialmente, proposta de legislação que imponha restrições ao uso do solo nas áreas diretamente afetadas;
- xi. Cronograma de execução;
- xii. Relatório de investigação confirmatória, realizada de acordo com o Termo de Referência da CETESB.

Adicionalmente, a CETESB criou uma lista de áreas contaminadas no estado de São Paulo, a qual incluiu alguns lixões e aterros controlados do estado. Essas áreas devem ser investigadas para confirmação da existência do passivo ambiental e para proposição de projeto de recuperação da área. Os documentos que apresentam diretrizes e valores de referência para áreas contaminadas são: Lei Estadual nº 13.577 (SÃO PAULO, 2009b), Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001), Decisão de Diretoria nº 045 (CETESB, 2014a), esta última lista valores orientadores para solos e águas subterrâneas, definindo-se valores de referência de qualidade, de prevenção e de intervenção.

Após a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, a CETESB ainda ampliou a legislação estadual: Decreto Estadual nº 57.071 (SÃO PAULO, 2011), Decreto Estadual nº 57.817 (SÃO PAULO, 2012a), Resolução SMA nº 38 (SÃO PAULO, 2012b), Decreto Estadual nº 59.263 (SÃO PAULO, 2013). Estes documentos

reafirmaram a cobrança de ações de recuperação e encerramento das instalações de destinação final de resíduos em situação inadequada.

A legislação internacional aborda estas questões sobre encerramento e cuidados pós-encerramento de maneiras divergentes entre os países. Laner et al. (2012) fizeram uma revisão crítica das normas de diferentes países – Áustria, Estados Unidos da América (EUA), Reino Unido, França, Alemanha, Japão, Canada e Holanda – e exploraram quais os critérios usados por estes países para permitir a interrupção do monitoramento de depósitos de resíduos desativados. Em resumo, os principais critérios são:

i. Período pré-determinado – alternativa vantajosa para os responsáveis pela instalação, principalmente sob o ponto de vista financeiro, uma vez que a previsão do prazo permite a execução de um cronograma de atividades. Entretanto, o período especificado de 20, 30 ou 40 anos pode não ser suficiente para o depósito de resíduo deixar de ser uma ameaça;

ii. Monitoramento perpétuo – esta alternativa elimina qualquer tipo de risco associado ao aterro, mas é considerada extrema (SCHARFF et al., 2011), porque existe a possibilidade de desperdício de recursos financeiros (geralmente cobrado como impostos) quando o depósito deixar de ser uma ameaça;

iii. Índices pré-determinados de qualidade de lixiviados, gases e resíduos – a avaliação frequente de amostras pode indicar o estado de degradação dos resíduos ao longo dos anos. Quando o lixiviado apresenta baixas concentrações de COD, NAT e DBO/DQO, ou quando os resíduos aterrados possuem baixa relação de CH/L – celulose, hemicelulose (CH) e lignina (Lig) – ou ainda quando o aterro apresente pequenas taxas de geração de gases, são indícios de avançado estágio de degradação do maciço de resíduos. Apesar de importantes, estes índices não são suficientes para dizer se todo o conteúdo aterrado foi bem decomposto, não incluem aspectos sobre a atenuação das frações inorgânicas (metais, íons maiores etc.) do maciço e do lixiviado, como também não consideram às condições locais de onde o depósito de resíduos está instalado;

iv. Estabilização completa do maciço de resíduos – esta alternativa considera que a estabilidade é atingida quando o maciço sem impermeabilização não acarreta impactos negativos à saúde humana ou ao meio ambiente. Esta avaliação é considerada ideal, porém não é prática, principalmente ao considerar o fluxo heterogêneo de água e de lixiviado dentro do maciço de resíduos (MALOSZEWSKI et

al., 1995; ROSQVIST et al., 2005), as elevadas concentrações de amônia e, a presença de outros componentes persistentes no conteúdo aterrado (FELLNER et al., 2009; WEBER et al., 2011);

v. Determinação de metas para cenários futuros – concentrações e características do aterro em cenários futuros são pré-determinadas através de modelagem, antes mesmo do encerramento do depósito de resíduo. Após o encerramento, quando todas as metas forem atingidas, a interrupção do monitoramento poderá acontecer.

Apesar da cobrança pelo monitoramento de depósitos de resíduos desativados existir, as avaliações e os critérios previstos em legislação nacional e internacional ainda não são suficientes para definir quando estes depósitos deixam de ser uma ameaça para a saúde humana e o meio ambiente. Acredita-se que para as agências ambientais, esta indefinição dificulta a avaliação dos projetos de encerramento de depósitos de resíduos, bem como a decisão de estender ou reduzir o período de monitoramento da área após o encerramento. Informações sobre as características de operação e sobre a qualidade dos resíduos aterrados, do lixiviado, do solo de cobertura são essenciais para guiar estes métodos de avaliação e os critérios específicos para cada depósito de resíduos (BARLAZ et al., 2002). Para ampliar a discussão sobre cuidados pós-encerramento de lixões e aterros controlados desativados, este trabalho apresenta uma caracterização detalhada do lixão desativado de São Carlos/SP.

4. ÁREA DE ESTUDO

Esta pesquisa teve o lixão desativado de São Carlos/SP como área de estudo. O antigo lixão faz parte da fazenda Santa Madalena e, por isso, também é conhecido como lixão Santa Madalena. A área está a sudeste do perímetro urbano de São Carlos, com acesso pela antiga estrada São Carlos-Analândia, a aproximadamente 2km da rodovia Washington Luiz SP310 (Figura 1).

Figura 1 – Localização do lixão Santa Madalena (Fonte: adaptado de PMSC, 2011)

Apesar de estar localizado em uma propriedade particular, as questões referentes ao lixão são de responsabilidade da Prefeitura Municipal de São Carlos. Como os depósitos de resíduos são áreas potencialmente poluidoras, este lixão é área de estudo desde a década de 80, quando ainda estava em operação. Entretanto, a maioria dos trabalhos teve como objetivo avaliar a qualidade das águas de sua área de influência.

4.1. CICLO DE VIDA DO LIXÃO SANTA MADALENA

4.1.1. Características de instalação

Na década de 70, uma voçoroca de grandes dimensões foi identificada na fazenda Santa Madalena. Como uma possibilidade de estabilizar o terreno e interromper o crescimento da voçoroca, os resíduos de São Carlos começaram a ser despejados nesta voçoroca. Oficialmente, a área tornou-se o lixão de São Carlos a partir de 1980. Portanto, a escolha do local para instalação do depósito de resíduo não foi fundamentada em quaisquer estudos de vulnerabilidade do meio físico local. Procedimentos básicos para evitar contaminação local também não foram considerados. Logo o depósito foi caracterizado por ser uma vala de disposição de resíduos a céu aberto, sem impermeabilização de base, sem drenagem e tratamento de efluentes (líquidos e gasosos), sem estruturas de drenagem superficial e subsuperficial (para evitar a entrada de água da drenagem pluvial e das águas subterrâneas) e sem cobertura.

Sob o aspecto dos recursos hídricos, o lixão foi instalado sobre uma área bastante vulnerável à poluição das águas superficiais e subterrâneas da região. Segundo Freitas (1996), Gadotti (1997) e PMSC (2010), na região onde o lixão foi instalado afloram sedimentos da Formação Botucatu (Figura 2) – formação do Sistema Aquífero Guarani que é um reservatório de água com excelente qualidade (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007). As águas deste aquífero são exploradas para 50% do abastecimento do município. Além disso, a fazenda Santa Madalena encontra-se na bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, designada pela Lei Municipal

4. Área de Estudo

nº 13.944 (SÃO CARLOS, 2006) como uma das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais de São Carlos (APREM) e como Área de Proteção Ambiental – APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá – conforme Decreto Estadual nº 20.960 (SÃO PAULO, 1983). Os outros 50% do abastecimento do município de São Carlos é proveniente das águas superficiais (PMSC, 2009) e a principal fonte é o córrego Ribeirão do Feijão, classificado pelo Decreto Estadual nº 10.755 (SÃO PAULO, 1977) como Classe 2. Ao final do talude do lixão existe uma nascente que alimenta o córrego São José, afluente do córrego Laranja Azeda, tributário do Ribeirão do Feijão. A topografia local dá indícios que o córrego São José é o principal receptor de eventuais contaminações oriundas do lixão.

Figura 2 – Mapa hidrográfico e geológico regional (Fonte: adaptado de PMSC, 2010)

4.1.2. Características de operação

Menezes (1995) acompanhou em 1994 e 1995 a deposição dos resíduos neste lixão, quando comprovou o despejo indiscriminado de resíduos sólidos urbanos, resíduos de construção e demolição, resíduos de serviços de saúde e resíduos industriais de curtume e de fábrica de papelão na voçoroca da fazenda. Esta

diversidade de resíduos contribuiu para a heterogeneidade da composição química do maciço e do lixiviado.

Gomes (1989) quantificou e caracterizou os resíduos sólidos de São Carlos, na época de operação do lixão Santa Madalena. Foi diagnosticado uma produção de aproximadamente $470 \text{ g.habitante}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, equivalente a $2.200 \text{ ton.mês}^{-1}$ de resíduos. A composição gravimétrica resultante dos resíduos sólidos de São Carlos foi de 56,7% matéria orgânica; 21,3% papel e papelão; 8,5% plástico; 5,4% metal; 1,4% vidro; 6,7% outros (restos de trapos, madeira, couro, borracha e inertes). O peso específico dos resíduos domiciliares de São Carlos resultou em $134,6 \text{ kg.m}^{-3}$.

Segundo Gadotti (1997), no início da operação do lixão, os resíduos foram depositados na parte superior da voçoroca, na região do PM01 (Figura 3), onde se formou uma coluna com resíduos de 1980, 1981 e 1982. Posteriormente, os resíduos passaram a ser depositados horizontalmente, cobrindo o fundo da voçoroca. Portanto, os resíduos depositados em 1980 e depositados entre 1983 e 1987 formaram a base do lixão. Antes da deposição de mais camadas de resíduos sobre esta base, a mesma recebeu uma camada de solo de cobertura em 1988, exigência da CETESB para autorizar a continuação da disposição final dos resíduos no lixão Santa Madalena.

Por conseguinte, a partir de 1988, os resíduos depositados recebiam solo de cobertura e o lixão Santa Madalena passou então a ser considerado um aterro controlado, mas após a escavação do maciço, observou-se que a frequência dessa cobertura não era diária. Os resíduos de 1988 foram depositados acima da camada de 1983, seguindo o mesmo método de deposição horizontal até 1992. A partir de 1993, os resíduos passaram a ser depositados de forma não ordenada. A disposição final dos resíduos foi esquematizada e estimada de forma simplificada por Gadotti (1997), sem considerar as camadas de cobertura. A profundidade das camadas de resíduos é bastante variada devido à conformação dos resíduos na voçoroca, que tinha a base do terreno bastante irregular. Estima-se, que existam perfis com até 25 m de espessura de resíduos.

4. Área de Estudo

Figura 3 – Esquema de deposição dos resíduos no lixão Santa Madalena de 1980 a 1996 e aproximação das profundidades da base do lixão (Fonte: adaptado de GADOTTI, 1997)

O proprietário da fazenda reportou que o solo usado para cobertura dos resíduos era trazido de fontes externas, pois ele via a chegada de caminhões de terra no lixão (informação verbal)¹. Entretanto, Menezes (1995) relatou que, durante sua pesquisa, o solo do entorno do lixão era utilizado para a cobertura de suas camadas de resíduos, o qual consistia em argila orgânica de média a alta plasticidade (proveniente da cobertura residual de rochas basálticas, com teor de ferro de 22%), mas ressalta-se que horizontes de solo arenoso foram verificados nas sondagens de Álvares (2000). Este alto teor de ferro, com certeza contribuiu para altas concentrações de Fe no maciço e no lixiviado do depósito. Esta divergência nas informações sobre o solo de cobertura foi confirmada na avaliação da composição do perfil.

Além das características supracitadas, Menezes (1995) determinou algumas características da área do lixão, tais como condutividade hidráulica do solo original (10^{-6} a $10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$), declividade (5 a 10%) e coeficiente de troca catiônica do solo (27 a 73 mmolc.kg^{-1}). Como a área possui um terreno bastante acentuado, o nível da água nos poços a montante é mais profundo e nos poços mais próximos ao curso d'água superficial é mais raso. Portanto, o nível estático do lençol freático varia na região do lixão entre 2,51 e 25,46 m (PMSC, 2011). Estes dados confirmam que a região onde o lixão foi instalado é ambientalmente desfavorável sob vários aspectos físicos do ambiente (área potencialmente erosiva, nível freático elevado, zona de recarga de aquífero) e do material depositado (resíduos industriais, hospitalares e de construção civil).

¹ Informação fornecida por Rizzoli em São Carlos, em 2013.

4.1.3. Características de encerramento

Em 1994, a operação do lixão Santa Madalena foi interrompida e a disposição final dos resíduos de São Carlos passou para a ser em um aterro em Guatapar/SP¹. Entretanto, no mesmo ano, os resíduos voltaram a ser depositados no antigo lixão. O lixão foi efetivamente encerrado em 1996, com aproximadamente 440.000 m³ de resíduos, volume depositado ao longo dos anos estimado por Velozo (2006). As atividades de encerramento consistiram em: (1) interrupção da deposição dos resíduos; (2) fechamento do maciço com cobertura final de solo pouco espessa e mal compactada; (3) plantação de gramínea; (4) alocação de curvas de níveis nas encostas e acima da cobertura final do lixão; e (5) construção de canais de drenagem para impedir que a drenagem superficial infiltrasse no maciço do lixão.

Conforme reportado pelo proprietário da fazenda, em 1996 foi recomendado que o gado das propriedades rurais pastasse sobre o lixão coberto para compactar a camada final de cobertura de solo (informação verbal)². Conforme análise realizada pela presente pesquisa, a condutividade hidráulica atual da cobertura está entre 10⁻⁵ cm.s⁻¹ e 10⁻⁴ cm.s⁻¹. Menezes (1995) constatou que as curvas de nível mal planejadas e a pastagem do gado originaram sulcos e exposição dos resíduos.

A estrutura de drenagem superficial da área está danificada. Logo, parte das guas da drenagem superficial infiltram no maciço de resíduos.

O conjunto das características de instalação, operação e encerramento resultou em um depósito de resíduos desativado sem estruturas de proteção ao meio ambiente e  saúde pública. Logo, o lixão Santa Madalena foi incluído na lista de áreas contaminadas do estado de São Paulo (CETESB, 2009).

4.1.4. Cuidados pós-encerramento

Após as constatações dos problemas de erosão, a CETESB proibiu a pastagem de animais sobre o terreno do lixão (informação verbal)³. Desde então, o perímetro que compreende o lixão (em vermelho na Figura 1) está cercado com cerca elétrica (Figura 4).

¹ Informação fornecida por Schalch em São Carlos, em 2014.

^{2 e 3} Informação fornecida por Rizzoli em São Carlos, em 2013.

Figura 4 – Vista geral da área do lixão Santa Madalena, onde as curvas de nível e a cerca elétrica podem ser identificadas. A plantação de goiaba e a criação de búfalos também podem ser avistadas (Fonte: PMSC, 2011)

A superfície do lixão possui aproximadamente 48.400 m² de área (LOPES, 2007). O terreno ainda é bastante irregular com regiões planas e outras com depressões. A declividade média do terreno é igual a 6,7% – topografia final de 15(H):1(V). O lixão desativado de São Carlos/SP está integrado à paisagem da fazenda e em sua vizinhança há residências, práticas agrícolas (plantação de goiaba) e criação de animais (gado e búfalos).

Não há registros de monitoramento continuado no lixão. Dados referentes ao lixão e ao monitoramento da qualidade das águas de sua área de influência, em sua maioria, foram obtidos de pesquisas feitas pelas universidades da região.

De 2009 a 2010, a Prefeitura Municipal de São Carlos, através de sua Coordenadoria de Meio Ambiente, realizou o monitoramento do lixão durante uma investigação ambiental detalhada para avaliação de risco à saúde humana, solicitada pela CETESB. Concentrações de Al, Sb, As, Ba, Pb, Co, Fe, Mn, Hg e Se nas águas subterrâneas do lixão apresentaram-se acima do valor de intervenção da Decisão da Diretoria nº 103 (CETESB, 2007). Concentrações de Sb, As, Ba e Se nas águas subterrâneas apresentaram-se acima dos valores máximos permitidos, segundo a Portaria 518 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2004) que vigorava no período do monitoramento. Maiores detalhes encontram-se na seção 4.1.5. Os mapas potenciométricos indicaram que a direção preferencial de fluxo subterrâneo é de Sudeste para Noroeste, isto é, do lixão para o córrego São José. O relatório final (PMSC, 2011) desta avaliação concluiu que na área do lixão e a sua jusante foram identificados riscos cumulativos não carcinogênicos para exposição à água

subterrânea (ingestão de água subterrânea) para todos os receptores considerados (residencial rural – criança e adulto), para os compostos Pb, Co, Fe e Mn.

Eventualmente a CETESB coleta e analisa amostras de alguns poços de monitoramento e verifica questões sobre erosão e drenagem na fazenda Santa Madalena. Além disto, a agência também fiscaliza a exposição de resíduos e a incidência de animais sobre o maciço de resíduos.

4.2. HISTÓRICO DOS ESTUDOS NO LIXÃO SANTA MADALENA

Na década de 80, Schalch (1984) avaliou as características do chorume produzido pelos resíduos de São Carlos. Também nessa época, iniciaram-se os estudos de um grupo de pesquisa da EESC/USP (Núcleo de Resíduos Sólidos) que usou o lixão Santa Madalena para instalação de aterros experimentais, para estudos de caracterização do lixiviado e para testar técnicas de tratamento de lixiviado (AKUTSU, 1985; LIMA, 1988; GOMES, 1989; MERBACH JUNIOR, 1989; VILAS BÔAS, 1990; BALDOCHI, 1990; LEITE, 1992; SCHALCH, 1992). Em paralelo, outros pesquisadores (da UFSCar, do IGC e da EESC) desenvolveram pesquisas com foco no contexto geológico de São Carlos, chamando atenção para a área do lixão Santa Madalena (ZUQUETTE, 1981; GONÇALVES, 1986). Neste período, foram instalados 13 poços de monitoramento na região do lixão (L1 a L14, sendo que o L3 não foi concluído).

Schalch (1984) produziu chorume a partir de amostras de 12 kg de resíduos coletados no próprio lixão. Seu experimento consistia no armazenamento isolado de 5 amostras, criando um ambiente anaeróbio (avaliando o desempenho do processo de estabilização anaeróbia) e escuro (evitando a proliferação de microrganismos fotossintéticos). Apenas uma das amostras produziu quantidade suficiente de chorume para análises (maior que 75 ml). A qualidade desta amostra foi monitorada por 7 meses (junho a dezembro de 1983), resultando na caracterização do chorume do lixão Santa Madalena (Tabela 4).

4. Área de Estudo

Tabela 4 – Qualidade do chorume produzido experimentalmente a partir de amostras de resíduos do lixão de São Carlos em 1983 (Fonte: SCHALCH, 1984)

Variáveis	15/jun	29/jun	10/jul	12/ago	02/set	08/out	05/nov	18/dez
pH	6	7	9	9	9	9	9	9
T _{ambiente}	24	23	20	17	20	22	24	26
T _{amostra}	21	21	19	16	19	20	22	26
W	93	97	97	97	97	97	98	98
NTK	1016	812	554	502	430	401	393	380
P	167	103	98	92	89	81	77	74
DQO	35.250	27.888	15.314	13.215	10.190	8.319	7.100	6.972
DBO ₅	26.150	18.502	6.220	4.820	2.980	2.100	890	292
MO	62	59	49	48	45	40	37	36

Nota₁: valores arredondados pela autora deste trabalho

Nota₂: unidades em mg.L⁻¹, com exceção de umidade W e matéria orgânica MO em %, de pH em unidades de pH e de temperatura T em °C

Schalch (1984) observou a queda acentuada de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), fósforo (P), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) e matéria orgânica (MO), como também o aumento significativo nos valores do pH. O autor indicou que sua configuração experimental (sem acréscimo de resíduos e água) pode ter acelerado o processo de decomposição dos resíduos e diminuído a produção de chorume. Portanto, a decomposição dos resíduos no lixão deve acontecer de maneira mais lenta e a geração de chorume deve ocorrer em maior quantidade, devido à entrada de água da chuva no maciço.

Gomes (1989) aplicou e discutiu novos métodos de avaliação de DQO, sólidos totais voláteis (STV), pH, teor de umidade (W) e temperatura (T) em amostras de resíduos aterrados do maciço do lixão e dos maciços de dois aterros sanitários experimentais instalados na área adjacente às células do lixão. Os aterros experimentais recebiam os resíduos dos caminhões de coleta de São Carlos, mas tomava-se cuidado para o não despejo de resíduos industriais. O valor médio para DQO e STV nos aterros foi de 15,7% e 40,3%, respectivamente. Para o mesmo período de análise, o valor médio encontrado no lixão Santa Madalena – na parte de mesmo período de aterramento – foi 16,0% para DQO e 37,4% para STV. Os valores encontrados no lixão foram bastante próximos aos encontrados nos aterros experimentais. Gomes (1989) realizou 10 campanhas de amostragem e análises, no período de maio de 1988 a fevereiro de 1989 e, após um tratamento estatístico, extrapolou seus dados através de equações em função do tempo e afirmou que o lixão Santa Madalena atingiria a fase metanogênica estável em 10 anos de aterramento. O resumo dos resultados de Gomes (1989) encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Qualidade dos resíduos sólidos aterrados de São Carlos na época de operação do lixão Santa Madalena (Fonte: GOMES, 1989)

Variáveis	Aterro 1	Aterro 2	Lixão
DQO	223 – 1.004	253 – 1.820	79 – 1.763
g DQO/ kg resíduo seco	58 – 251	63– 455	20 – 441
STV	17 – 58	19 – 63	6 – 52
pH	6		6
W	42 – 44		54
T _{amostra} (°C)	35 – 37		-

Nota₁: valores arredondados pela autora deste trabalhoNota₂: unidades em mg.L⁻¹, com exceção de umidade W e STV em %, de pH em unidades de pH e de temperatura T em °C

Na década de 90, Schalch (1992) e outros grupos de pesquisa da EESC/USP e da UFSCar atuaram no lixão Santa Madalena, com o objetivo de caracterizar o contexto geológico mais detalhado da área do lixão, resultando em 5 trabalhos que se complementam (MENEZES, 1995; MATSUZAKI, 1998; FREITAS, 1996; GADOTTI, 1997; ÁLVARES, 2000), e de verificar os impactos ambientais do lixão sobre as águas superficiais e subterrâneas (RIOS, 1993; TEIXEIRA, 1993; BOSSOLAN, 1993, entre outros). Nessa época então, observou-se que alguns poços de monitoramento instalados pela UFSCar haviam sido cobertos por resíduos e desapareceram, restando apenas os poços L5, L12 e L14. Após esta constatação, o grupo da EESC/USP se mobilizou para a construção de mais 18 poços (L15 a L33, sendo que o L22 não foi concluído).

Schalch (1992) continuou a monitorar os mesmos aterros experimentais de Gomes (1989), incluindo amostragens e análises de lixiviados e gases. Após a formação de um banco de dados mais consistente da qualidade do material sólido, líquido e gasoso, o autor usou um programa estatístico para avaliar o conjunto de dados e concluiu que os dois aterros experimentais tiveram o mesmo comportamento dinâmico (temporal) para metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), DQO, STV, sólidos suspensos voláteis (SSV), sólidos totais (ST), pH, T, nitrogênio orgânico (N_{org}), fosfato (PO₄), Ni, alcalinidade, condutividade elétrica (CE), Fe, Cr e Mn. Não houve boa correlação para o Cu entre os dois aterros, fato atribuído a prováveis fontes pontuais com resíduos industriais. Os pares das variáveis que apresentaram forte correlação foram: DQO/STV, DQO/pH, DQO/Mn, DQO/Fe, STV/Mn, pH/STV, CH₄/nitrogênio amoniacal total (NAT).

Rios (1993) monitorou características biológicas, físicas e químicas de córregos da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, de novembro 1990 a outubro de 1991, incluindo o córrego São José, o qual recebe os efluentes do lixão Santa Madalena e

4. Área de Estudo

de áreas de criação de animais. Como principal impacto detectado, este córrego apresentou maior pH, alcalinidade e CE comparado aos demais, principalmente nos meses mais secos. O resumo de seus resultados é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Qualidade da água do córrego São José, em pontos a montante e a jusante do lançamento dos efluentes do lixão Santa Madalena, dados de 1990 e 1991 quando o lixão estava em operação (Fonte: RIOS, 1993)

Variáveis	Montante	Jusante
OD	7 – 9	0,4 – 8
pH	6 – 8	6 – 7
Alcalinidade	0,3 – 0,5	0,3 – 1,5
CE	34 – 46	69 – 220
HCO ₃	16 – 30	21 – 93
SST	0,4 – 26	6 – 147
SSV	0,4 – 4	3 – 55
SSF	nd – 22	3 – 93
NTK	258 – 533	2.426 – 8.044
NAT	9 – 34	141 – 5.701
NO ₃	84 – 214	86 – 1870
NO ₂	0,6 – 4	4 – 18
PO ₄ total dissolvido	8 – 27	19 – 204
P total	17 – 42	38 – 555
MO no sedimento	0,4 – 3	0,3 – 29

Nota₁: valores arredondados pela autora deste trabalho; nd = valor abaixo do limite de detecção. Nota₂: unidades em mg.L⁻¹, com exceção de umidade e matéria orgânica MO em %, de pH em unidades de pH, de NTK, NAT, NO₃, NO₂, PO₄, P em µg.L⁻¹ e de condutividade elétrica CE em µS.cm⁻¹

Adicionalmente, Rios (1993) concluiu que as estações de coleta nº 4 (montante) e nº 5 (jusante) apresentaram faixas de variação de vazão entre 0,05 m³.s⁻¹ e 0,30 m³.s⁻¹ e de temperatura da água entre 15°C (junho/1991) e 27°C (novembro/1990).

Menezes (1995) utilizou dados de caracterização dos resíduos e lixiviados, e juntamente com dados físicos da bacia, avaliou os impactos ambientais causados pelo lixão Santa Madalena. Na Tabela 7 foram transcritos os resultados da qualidade de água subterrânea (poços L5, L12, L14) e superficial (pontos no córrego São José P1, P2, P3).

Tabela 7 – Qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área do lixão Santa Madalena, dados de 1993 e 1994 quando o lixão estava em operação (Fonte: MENEZES, 1995)

Variáveis	L5	L12	L14	P1	P2	P3
Alcalinidade	nd – 1	866 – 1.102	121 – 162	376 – 520	nd – 13	10 – 26
CE	38 – 162	2.433 – 5.984	487 – 598	1.058 – 1.460	26 – 79	67 – 90
pH	3 – 5	7	6	7	3 – 7	6 – 6,5
T _{amostra}	22 – 25	23 – 27	19 – 24	22 – 27	17 – 26	18 – 25
Fe	0,1	0,1 – 0,2	0,01	3 – 9	nd – 0,5	0,5 – 1,2
Mn	nd – 0,4	nd – 0,1	0,5 – 0,9	0,1 – 0,9	nd – 0,2	nd

Nota₁: valores arredondados pela autora deste trabalho; nd = valor abaixo do limite de detecção; Nota₂: unidades em mg.L⁻¹, com exceção de temperatura em °C, de pH em unidades de pH e de condutividade elétrica CE em µS.cm⁻¹; Notas: L5 poço de montante, L12 poço dentro do maciço, L14 poço de jusante; P1 água superficial da nascente do talude do maciço, P2 água superficial a montante do maciço, P3 água superficial a jusante de P1

A autora comprovou que os efluentes do lixão estavam degradando a qualidade da água do córrego São José e do lençol freático. Ao mesmo tempo, chamou atenção sobre os valores de jusante, mostrando que a vazão do rio auxilia na atenuação dessa poluição, diluindo os efluentes lançados pelo lixão.

Gadotti (1997) também monitorou a qualidade das águas subterrâneas (Tabela 8) nos poços de montante L15, L16, L17, L18, L19, nos poços de jusante L24 (obstruído na metade do monitoramento), L25, L26, L27, L28, L29 e nos poços dentro do maciço L30, L31, L32 e L33. Os poços instalados nas regiões com resíduos mais antigos apresentaram maiores pH e alcalinidade, no maciço e a jusante. Em contraste, os menores valores de pH e alcalinidade foram dos poços com resíduos mais novos, concordando com as características das diferentes fases de decomposição dos resíduos. DQO, CE, nitrato (NO_3), Mg, Ba e cloreto (Cl^-) mantiveram-se elevados homogeneamente em toda região do lixão. O Fe se manteve elevado na maior parte do lixão, mas principalmente nos resíduos novos. A montante, o Fe também era elevado. Logo, estas elevadas concentrações de Fe podem ser provenientes do intemperismo da formação geológica – rica em Fe, como diagnosticado por Menezes (1995).

Tabela 8 – Faixa de valores da qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área do lixão Santa Madalena, dados de 1996 quando o lixão estava em processo de encerramento (Fonte: GADOTTI, 1997)

Variáveis	P controle	P montante	P maciço	P jusante	C montante	C jusante
pH	6	5 – 6	5 – 7	5 – 7	6 – 7	5 – 6
Alcalinidade	37	3 – 87	17 – 204	11 – 692	18 – 28	25 – 52
CE	51	24 – 146	44 – 384	40 – 1.973	20 – 49	61 – 99
Fe	0,1	nd – 12	nd – 8	nd – 7	0,2 – 1	0,3 – 2
Mn	nd	nd – 0,4	nd – 0,5	nd – 2	nd – 0,1	nd – 0,2
OD	7	0 – 6	0 – 2	0 – 4	4 – 8	0 – 3
Mg	3	0,5 – 10	1 – 7	1 – 14	1 – 2	2 – 3
ST	150	120 – 24.548	138 – 1.872	34 – 828	26 – 172	12 – 96
STF	76	6 – 22.164	8 – 1.606	10 – 518	8 – 80	4 – 36
STV	74	18 – 2.530	36 – 720	8 – 564	8 – 92	6 – 72
DQO	23	1 – 110	9 – 123	1 – 232	6 – 102	1 – 44
PO_4	0,1	nd – 0,1	nd – 0,2	nd – 0,1	0,01	0,04 – 0,2
Ba	0,05	nd – 0,2	0,1	0,06 – 2	nd – 0,05	0,05 – 0,1
NTK	7	nd – 29	0 – 29	nd – 145	nd – 13	nd – 7
NO_3	0,7	0,2 – 4	0,3 – 4	0,2 – 14	0,3 – 1	0,3 – 1
Cl^-	0,6	1 – 13	1 – 35	0,5 – 265	0,3 – 3	4 – 20
Ca	5	1 – 12	2 – 11	2 – 20	2 – 3	3 – 4
Dureza	37	nd – 233	nd – 95	nd – 246	9 – 33	10 – 75

Nota₁: valores arredondados pela autora deste trabalho; nd = valor abaixo do limite de detecção

Nota₂: unidades em mg.L^{-1} , com exceção de pH em unidades de pH e de condutividade elétrica CE em $\mu\text{S.cm}^{-1}$

Nota₃: P = poço de monitoramento e C = córrego

Caso semelhante aconteceu com o Mn, podendo ser característico do solo da região, mas as concentrações detectadas foram baixas. Os maiores valores de Mn

4. Área de Estudo

estavam nas águas com baixo pH (acidez mobiliza metais). Gadotti (1997) identificou baixos valores de OD no maciço e a jusante, que diminuem OD das águas do córrego. Não foram detectadas concentrações de Cr, Cu, Ni, Zn, Pb e Cd. O autor concluiu que a formação geológica demonstrou alta capacidade de atenuação da poluição.

As pesquisas mais recentes realizadas no mesmo lixão são de Lopes (2007), PMSC (2011), uma pesquisa de doutorado de Abreu (2013) que está em andamento e a presente pesquisa.

Lopes (2007) fez um levantamento sobre todos os depósitos de resíduos (lixões, aterros controlados e aterros sanitários) da bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13) e avaliou a qualidade das águas subterrâneas (L20, L30, L26, L27) e do córrego São José. A autora realizou 4 campanhas de amostragem no período de março 2004 a fevereiro de 2005. Na Tabela 9 é apresentado um resumo de seus resultados. As variáveis sulfato (SO_4), sulfeto (S^{2-}), fluoreto (F^-), Zn, Cr, Cd, Ni, Mn, Pb, Al e Cu também foram mensuradas, mas todas tiveram concentrações próximas a zero.

Tabela 9 – Qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área do lixão Santa Madalena, dados de 2004 e 2005 quando o lixão estava encerrado (Fonte: LOPES, 2007)

Variáveis	L20	L30	L26	C Montante	C Jusante
CE	28 – 41	106 – 238	170 – 211	26 – 37	44 – 72
pH	5 – 6	5 – 6	4 – 6	6 – 7	6 – 7
T amostra	24	24 – 27	23 – 26	19 – 24	20 – 25
Turbidez	8 – 271	19 – 258	10 – 232	3 – 13	189 – 69
Cor aparente	46 – 925	140 – 825	15 – 800	24 – 98	145 – 231
OD	4 – 5	0,2 – 2	0,3 – 3	8 – 9	3 – 7
Cl^-	1 – 3	1 – 37	1 – 51	0,4 – 1	2 – 4
NTK	0,5	8 – 15	2 – 5	0,6 – 0,7	6 – 13
NAT	0,1 – 0,2	2 – 3	2 – 3	nd – 0,1	1 – 3
NO_3	1	0,2 – 4	0,1 – 10	0,1 – 0,3	0,2 – 2
COT	1 – 4	2 – 6	2 – 5	1 – 4	2 – 4
P	0 – 2	nd – 0,1	nd – 0,2	nd – 0,1	nd – 0,1
Fe	0,4 – 7	3 – 15	0,2 – 33	0,1 – 0,6	0,2 – 2
Mn	nd	0,2 – 0,3	0,1 – 0,4	0	nd – 1
ST	96 – 422	67 – 378	243 – 1.874	54 – 68	104 – 266
STF	18 – 240	39 – 274	84 – 1.459	8 – 42	43 – 89
STV	32 – 182	28 – 85	99 – 415	17 – 53	31 – 177
STD	63 – 155	61 – 369	71 – 1.871	25 – 66	43 – 196
DBO_5	nd – 9	nd – 17	nd – 9	nd	nd – 9
DQO	13 – 56	10 – 53	17 – 49	0 – 13	7 – 47

Nota1: valores arredondados pela autora deste trabalho; nd = valor abaixo do limite de detecção

Nota2: unidades em mg.L^{-1} , com exceção de temperatura em $^{\circ}\text{C}$, de pH em unidades de pH, de turbidez em unidades de turbidez, de cor em unidades de cor e de condutividade elétrica CE em $\mu\text{S.cm}^{-1}$

Nota3: L20 poço de montante, L30 poço dentro do maciço, L26 poço de jusante; C água superficial do córrego

Lopes (2007) identificou que a água subterrânea da área tinha baixo pH, mas que esta é uma característica natural das águas subterrâneas da porção livre do SAG. A autora concluiu que o lixão Santa Madalena estaria em processo de estabilização, por apresentar CE e concentrações de Cl^- , P, NAT, NTK, DBO_5 , DQO, carbono

orgânico total (COT), Mn e Fe muito inferiores às encontradas no atual aterro sanitário de São Carlos.

Durante a investigação ambiental detalhada (PMSC, 2011), os nomes dos poços supracitados foram alterados, os poços L12, L32 e L33 não foram encontrados e mais 10 poços de monitoramento (PM15 a PM24) foram construídos. O PM29 foi construído pela EESC/USP para a presente pesquisa. Na Tabela 10 e na Figura 5 algumas informações e a equivalência dos poços ainda existentes no lixão são apresentadas.

Tabela 10 – Identificação dos poços de monitoramento existentes no lixão Santa Madalena

Nomenclatura inicial	Nomenclatura atual	Construção	Profundidade (m)	Nível estático (m)
L5	PM10	UFSCar	8,84*	7,99*
L14	PM27	UFSCar	8,70***	7,94***
L15	PM11	USP	10,50##	8,04*
L16	PM09	USP	8,25##	7,00*
L17	PM06	USP	19,20##	18,06**
L18	PM05	USP	22,70##	19,55*
L19	PM03	USP	16,70##	16,04*
L20	PM02	USP	18,30##	seco*
L21	PM01	USP	17,40##	seco*
L23	PM04	USP	19,00##	seco*
L24	PM07	USP	13,44##	seco*
L25	PM08	UFSCar	11,60##	7,32**
L26	PM13	USP	10,10##	8,35*
L27	PM26	USP	10,66##	3,99***
L28	PM25	USP	7,30##	2,56***
L29	PM28	USP	4,73##	1,47***
L30	PM14	USP	10,60##	6,42*
L31	PM12	USP	13,20##	6,76*
PM15	PM15	PMSC	30,00**	27,62**
PM16	PM16	PMSC	22,50**	19,71**
PM17	PM17	PMSC	22,50**	11,14**
PM18	PM18	PMSC	15,00**	8,31**
PM19	PM19	PMSC	15,00**	12,99**
PM20	PM20	PMSC	12,00**	5,89**
PM21	PM21	PMSC	6,00**	4,81**
PM22	PM22	PMSC	22,00**	14,89**
PM23	PM23	PMSC	20,00**	14,99**
PM24	PM24	PMSC	30,00**	25,46**
PM29	PM29	USP	20,00#	6,66#

##medição em julho de 1998; *medição em outubro de 2009; **medição em julho de 2010; ***medição em dezembro de 2010; #medição em dezembro de 2012

4. Área de Estudo

Figura 5 – Localização dos poços de monitoramento no lixão desativado de São Carlos (Fonte: adaptado de PMSC, 2011)

PMSC (2011) realizou levantamento geofísico que é apresentado no ANEXO 2 e após o término da investigação ambiental, constatou-se que amostras de água subterrânea apresentaram concentrações acima do valor de intervenção da Decisão da Diretoria nº 103 (CETESB, 2007) e da Portaria 518 (MS, 2004) para os metais: Al (PM19, PM20 e PM24), Sb (PM17, PM18, PM19, PM21, Artesiano-01, Artesiano-02, Artesiano-03 e Nascente), As (PM17, PM24 e Artesiano-02), Ba (PM15 e PM24), Pb (PM06, PM15, PM17, PM19, PM20, PM21, PM22 e PM24), Co (PM15, PM16, PM20, PM22, PM24, PM25 e Artesiano-01), Fe (PM16, PM20, PM21 e PM25), Mn (PM15, PM20, PM22, PM24 e PM25), Hg (Artesiano-02) e Se (PM15, PM16, PM22 e PM24).

Após a comparação dos resultados destas pesquisas, foi possível notar, localmente, o impacto diferenciado das diferentes idades de aterramento na qualidade

das águas subterrâneas. Os principais processos de contaminação das águas aconteceram durante a fase de operação e logo após o encerramento do lixão. O tempo de maturação dos resíduos e a diluição do lixiviado nas águas são fatores que contribuem para a minimização da mobilização da maioria dos poluentes em depósitos de resíduos antigos. Isto pode ser confirmado através das avaliações realizadas no lixão Santa Madalena, as quais mostraram a melhora da qualidade das águas subterrâneas e superficiais ao longo dos anos. Esta constatação pode induzir os gestores a pensar que o lixão Santa Madalena já não apresenta mais riscos para a saúde pública e para o meio ambiente. Entretanto, para fazer tal conclusão, é necessário fazer uma avaliação mais direta que envolva a caracterização dos resíduos aterrados e do lixiviado deste lixão. Conhecer as características de lixões, aterros controlados e aterros sanitários é importante para fornecer subsídios ao gerenciamento dos resíduos sólidos e à avaliação do seu impacto nos recursos hídricos e esse banco de dados deve ser considerado em projetos de novos aterros sanitários e de recuperação de áreas degradadas.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Dia 16/04/2010 foi realizada uma visita técnica ao lixão desativado para inspeção da situação da cerca, da cobertura, das estruturas de drenagem superficial e dos poços de monitoramento na área. Nesta ocasião, uma amostra de água de uma nascente do final do talude do lixão foi coletada e sua análise (Apêndice F) indicou indícios de contaminação das águas, principalmente por NAT, Cr, Cd e Fe.

5.1. PREÂMBULO

Para melhorar o entendimento deste capítulo, apresenta-se o resumo das etapas de trabalho através da Figura 7.

Figura 6 – Resumo esquemático das etapas de trabalhos em campo e em laboratório.

O detalhamento de cada etapa de trabalho é descrito a seguir.

5.2. INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL

Uma estação experimental foi instalada dentro do maciço de resíduos do lixão desativado de São Carlos/SP para análise do conteúdo aterrado e do lixiviado em camadas de resíduos com diferentes idades de deposição. Adicionalmente, amostras de águas subterrâneas coletadas em poços de monitoramento a montante, dentro e a jusante do maciço também foram analisadas. As posições dos pontos amostrados em relação ao maciço estão na Figura 7.

Figura 7 – Posição da estação experimental e dos poços de monitoramento amostrados no lixão Santa Madalena

5.2.1. Instalação da estação experimental

As etapas de montagem da estação experimental aconteceram em diferentes períodos, com início em junho 2011 e finalização em novembro 2012, condicionadas à liberação de recursos, condições climáticas, contratação de serviços e período de intercâmbio na Alemanha (Fachhochschule Köln).

A estação foi baseada nos experimentos de duas teses de doutorado que trabalharam com estudos hidrogeoquímicos em áreas contaminadas por fossas sépticas (BERTOLO, 2001; VARNIER, 2007). Porém, por se tratar de um lixão, o projeto inicial da estação experimental foi sendo modificado a cada contratempo encontrado durante sua instalação. A estação experimental (Figura 8) consiste em um poço cacimba instalado no maciço de resíduos, com lisímetros de sucção em sua parede.

Figura 8 – Croqui da estação experimental instalada no maciço do lixão desativado de São Carlos

A estação experimental deveria ser alocada em um perfil que atendesse aos seguintes critérios: (1) grande espessura de camada de resíduos; (2) existência de camadas de resíduos com diferentes idades de deposição; (3) elevada profundidade do nível freático.

Para fazer esta estimativa, foi necessário cruzar informações sobre a operação do lixão descritas por Gadotti (1997) e de mapas topográficos e potenciométricos da região do lixão divulgados por PMSC (2011). Após esta avaliação, três possíveis posições para a estação foram determinadas, mas como critérios adicionais, observou-se que a estação deveria ser instalada em local de fácil acesso e fora do escoamento da drenagem pluvial da grande voçoroca existente a montante do maciço, restando apenas a posição escolhida (Figura 7) que atendeu ao conjunto de características propícias para a locação da estação.

5.2.2. Escavação e revestimento do poço cacimba

Um poço cacimba de 7,0 m de profundidade – nível do lençol freático – foi escavado manualmente (Figura 9) por um poceiro e dois ajudantes entre os dias 28/06/2011 e 22/07/2011. Ferramentas e utensílios manuais como pá, enxadinha, enxadão, facão, garfo, tesoura, baldes e um sarilho com as bases fincadas ao redor do poço foram usados para escavação e elevação do material aterrado. À medida que a escavação avançava, anéis de concreto armado eram sobrepostos para conter a parte escavada e para revestir o poço. Os anéis têm aproximadamente 300 kg, 0,5 m de altura, 0,06 m de espessura e 1,5 m de diâmetro interno. O diâmetro foi escolhido para possibilitar a entrada de pessoas para os trabalhos de instalação e monitoramento dos equipamentos.

As camadas de solo de cobertura permitiam o avanço mais rápido da escavação. Por outro lado, as camadas de resíduos demandaram bastante esforço e tempo para serem escavadas. Além disso, a partir da profundidade de 1,0 m, lençóis suspensos de lixiviado preenchiam o espaço vazio do poço cacimba. A cada início de dia de trabalho, o volume de 1 a 4 m³ de lixiviado era retirado com baldes para a retomada da escavação. Por estes motivos, para a conclusão do poço cacimba com 7 m de profundidade foram necessários 21 dias trabalhados, com uma média para

6. Resultados e Discussão

escavação de 33 cm.dia⁻¹. Porém, nas descrições do diário de campo percebeu-se que o ritmo de avanço da escavação variou bastante, de 10 a 60 cm.dia⁻¹.

Figura 9 – Escavação manual do poço cacimba dentro do lixão desativado de São Carlos

Após o término da escavação, houve tentativas de selagem do poço cacimba com intuito de evitar fluxo de lixiviado para o seu interior. Entretanto, devido à constante entrada de lixiviado pela lateral e pela base do poço – que formava o lençol suspenso de lixiviado – e à infraestrutura disponibilizada na área de estudo, esta selagem não foi concluída.

5.2.3. Amostragem e análises do material escavado

Apesar das dificuldades encontradas, a escavação manual das camadas de resíduos permitiu a coleta individual de amostras sólidas e líquidas para a caracterização do maciço de resíduos e também possibilitou a coleta de resíduos preservados com partes legíveis (Figura 10), os quais orientaram a datação do material aterrado em perfil. Este tipo de amostragem não é possível em escavações com máquinas. Nesta etapa, 60 amostras do conteúdo aterrado no maciço foram coletadas, as quais estão identificadas na Tabela 11.

Figura 10 – Resíduos com escrita legível do material aterrado no lixão desativado de São Carlos

6. Resultados e Discussão

Tabela 11 – Identificação das amostras coletadas durante a escavação do poço cacimba

Amostra	Quantidade de amostras	Tipo de amostra	Sigla	Tipo de dados
Amostra sólida indeformada	1	Solo da cobertura final	ASI	K
Amostra sólida deformada	4	Solo das coberturas final e intermediárias	ASD	Granulometria
Amostra sólida aterrada	15	Solos das cobertura e resíduos aterrados	ASA	W, ST, STF, STV e obtenção de ES
Amostra sólida legível	24	Embalagens legíveis, revistas e jornais legíveis	ASL	Datação
Amostra líquida estagnada	14	Chorume imóvel	CI	Variáveis químicas
Amostra líquida de percolação	2	Lixiviado do lençol suspenso	LS	Variáveis químicas
Extrato de solubilização	14	Líquido extraído das amostras ASA	ES	Variáveis químicas

Nota₁: chorume imóvel é um líquido encontrado estagnado sobre camadas dos resíduos sólidos

Nota₂: K = condutividade hidráulica, W = umidade, ST = sólidos totais, STF = sólidos totais fixos, STV = sólidos totais voláteis, ES = extrato de solubilização

Para a retirada da amostra ASI (Figura 11) foi utilizado um amostrador padronizado de ferro e dimensões 30 cm x 30 cm x 30 cm. A cobertura vegetal (incluindo raízes) foi retirada e, logo após, o solo de cobertura foi delineado para o cravamento do amostrador. A amostra foi selada com papel filme e levada para determinação da condutividade hidráulica do solo de cobertura do lixão. Em laboratório, foi realizado o ensaio de permeabilidade com carga variável em um arranjo de ensaio de adensamento, segundo método descrito em HEAD (1994).

Figura 11 – Amostra indeformada do solo de cobertura do lixão desativado

Após a retirada da amostra indeformada, a coleta das demais amostras sólidas (Figura 12) aconteceu conforme o avanço da escavação.

Figura 12 – Amostras sólidas deformadas (ASD) e de amostras sólidas aterradas (ASA) do maciço do lixão desativado de São Carlos

O material sólido removido do poço era disposto em montes sobre a superfície e quando o monte apresentava aparência homogênea (cor, cheiro e tamanho) ou quando camadas de solo de cobertura apareciam, fazia-se uma nova coleta. Os resíduos maiores que 5 cm eram previamente removidos. Assim, foram coletadas as amostras ASD (com exceção da primeira amostra deformada do solo de cobertura), compostas por aproximadamente 1,5 kg de solo, e as amostras ASA, compostas por aproximadamente 1,0 kg de resíduos aterrados. As amostras ASD passaram por análise granulométrica, através da combinação de peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7.181 (ABNT, 1984). As amostras ASA serviram para determinação de W, ST, sólidos totais fixos (STF) e STV de cada camada que teve material amostrado, conforme NBR 10.664 (ABNT, 1989). As mesmas também foram usadas para obtenção de extratos de solubilização (ES), conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004).

As amostras líquidas (Figura 13), cada uma com aproximadamente 1 litro, foram coletadas diretamente sobre os resíduos aterrados, dentro do poço cacimba, durante sua escavação. As amostras de chorume imóvel (CI) foram coletadas de poças de líquidos de cor escura e odor forte que estavam estagnados sobre as camadas de resíduos sólidos, sempre que possível nas mesmas profundidades da coleta das amostras ASA. As amostras de lixiviado suspenso (LS) foram coletadas nas profundidades de 1,0 m e 2,0 m, 20 e 44 horas após a interrupção da escavação, respectivamente.

Figura 13 – Amostras do material líquido encontrado no maciço do lixão desativado de São Carlos

As amostras CI, LS e ES foram submetidas a análises de variáveis químicas conforme métodos analíticos descritos em APHA (2012). Detalhamento sobre as variáveis analisadas estão na seção 5.6. Todas as amostras líquidas e sólidas eram individualmente colocadas em garrafas plásticas e sacos plásticos, respectivamente. Com exceção das amostras ASI, ASD e ASL, todas as amostras foram armazenadas em freezer a 4°C. O restante do material removido durante a escavação do poço cacimba foi acomodado em caçambas (Figura 9) e levado ao atual aterro municipal de São Carlos para disposição final.

5.3.INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO

5.3.1. Poço de monitoramento

Os poços de monitoramento instalados dentro do maciço de resíduos, ou desapareceram ainda na época de operação e de encerramento do lixão, ou estão localizados em regiões de difícil acesso. Portanto, para amostrar água subterrânea

logo abaixo do maciço de resíduos, o poço de monitoramento PM29 foi instalado ao lado da estação experimental (Figura 14). Seu perfil construtivo está no Anexo 1.

Figura 14 – Instalação do poço de monitoramento PM29 na porção de resíduos do lixão desativado

A preparação do terreno, a perfuração e o acabamento do poço cacimba foram realizados entre os dias 10 e 14/07/2012. Apesar do período de instalação ser de estiagem na região, em julho de 2012 ocorreram muitas chuvas, o que dificultou o acesso do caminhão de aproximadamente 17 toneladas sobre a superfície úmida do lixão. A posição do PM29 foi determinada no local onde o caminhão conseguiu chegar, a 4,5 m do poço cacimba. Durante a perfuração, ao notar a saída de solo sem resíduos do furo, realizou-se a coleta de duas amostras sólidas nas profundidades de 10,0 e 18,0 m (Tabela 12). Estas amostras, provavelmente, são do terreno original antes da deposição dos resíduos e também foram submetidas ao ensaio de solubilização, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004) e seus extratos de solubilização foram

6. Resultados e Discussão

submetidos a análises de variáveis químicas conforme métodos analíticos descritos em APHA (2012).

Tabela 12 – Identificação das amostras coletadas durante a perfuração do poço de monitoramento

Amostra	Quantidade de amostras	Tipo de amostra	Símbolo	Tipo de dados
Amostra sólida deformada	2	Solo da base do lixão	SB	Obtenção de ES
Extrato de solubilização	2	Líquido extraído das amostras SB	ESB	Variáveis químicas

5.3.2. Verificação dos lisímetros de sucção

O lisímetro de sucção (Figura 15) utilizado, da marca Apager, é composto por uma cápsula de cerâmica porosa de 2" diâmetro por 0,06 m de comprimento, conectada a um cilindro de PVC de 2" por 1 m de comprimento vedado por uma tampa de PVC. O equipamento apresenta duas mangueiras finas de plástico em seu interior: a primeira estende-se até a posição da tampa e é utilizada para a aplicação do vácuo ou ar sob pressão, enquanto a segunda estende-se até o fundo do corpo do tubo, conectada a um frasco de vidro para a coleta de amostras líquidas. Os lisímetros instalados no maciço do lixão retiram as amostras de lixiviado de camadas de diferentes idades de deposição dos resíduos. Para o funcionamento destes equipamentos, aplica-se pressão negativa (gerada por uma bomba a vácuo) na primeira mangueira, induzindo a entrada do lixiviado do maciço através da cápsula porosa, o qual é armazenado em seu interior. Posteriormente, a mangueira de vácuo é desconectada da bomba para despressurização do sistema, estes procedimentos redirecionam o lixiviado do interior do lisímetro até a garrafa de amostragem, através da segunda mangueira.

Figura 15 – Esquema prático de instalação e funcionamento do lisímetro para coleta de amostras líquidas. (A) Lisímetro sujeito a pressão atmosférica, antes da coleta (B) Aplicação de pressão negativa em todo o sistema (C) A pressão negativa succiona a amostra do meio para o interior do lisímetro através da cápsula porosa (D) A mangueira de ar é desconectada da bomba a vácuo, permitindo a entrada da pressão atmosférica no sistema, a qual força o escoamento da amostra pela mangueira de coleta até o frasco coletor, ainda sujeito a pressões negativas.

Antes de serem instalados, os lisímetros de sucção passaram por processo de descontaminação (Figura 16), segundo a norma ASTM 4696 (ASTM, 2008), que é importante para a limpeza dos poros da cerâmica, os quais podem ter sido contaminados com poeira durante a sua fabricação. E também passaram por um teste de vácuo, para evitar vazamentos de ar durante a amostragem do lixiviado.

Figura 16 – Processo de descontaminação dos lisímetros de sucção

A descontaminação consiste na imersão das cápsulas porosas em solução de ácido clorídrico por 24 horas e na passagem do ácido em todo o equipamento, em um procedimento semelhante ao da retirada de uma amostra. Posteriormente, faz-se a passagem de água deionizada em todo o equipamento, como procedimento de enxague, até que a condutividade elétrica da água coletada nos frascos apresente um valor semelhante ao valor da condutividade elétrica da água deionizada utilizada. A norma 4696 (ASTM, 2008) recomenda a utilização de ácido clorídrico 8,0 N para a descontaminação das cápsulas. Porém, Bertolo (2001) e Varnier (2007) relataram que esta concentração indicada pela norma era muito elevada, levando à corrosão da cola utilizada para unir a cápsula ao tubo de PVC. Por este motivo, foi utilizado o HCl 0,5 N, recomendado por Varnier (2007).

O teste de vácuo foi realizado após a descontaminação dos lisímetros, com as cápsulas porosas ainda úmidas, para evitar a entrada de ar pelos poros da cerâmica. Este teste consiste em conectar uma bomba a vácuo na mangueira de ar do lisímetro e um vacuômetro na mangueira de amostragem. Aplicou-se sucção negativa de -650 mmHg no sistema e monitorou-se por quanto tempo o vácuo permaneceu no sistema. Durante a preparação para a coleta de novembro de 2013, percebeu-se que os

primeiros quatro lisímetros estavam quebrados. Em dezembro de 2013, novos lisímetros foram preparados e instalados, substituindo os quebrados. A etapa da descontaminação durou sete dias na primeira preparação e dez dias na segunda. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos na etapa de preparação dos lisímetros.

Tabela 13 – Dados da descontaminação e do teste de vácuo nos lisímetros de sucção

Lisímetro	Condutividade inicial ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Condutividade final ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Tempo de vácuo (h)	Profundidade* (m)
A**	3440	1,13	10	2,8(L5)
B**	3941	1,22	-	-
C**	4087	1,15	20	1,3 (L2)
D**	3033	quebrou	-	-
E**	3554	1,06	12	2,3 (L4)
F**	3058	1,05	12	0,8 (L1)
G**	4005	1,09	12	3,3 (L6)
H**	3823	1,05	12	1,8 (L3)
I***	3760	1,69	12	0,8 (L1)
J***	3658	1,33	12	1,3 (L2)
K***	3942	1,40	12	1,8 (L3)
L***	3307	1,47	12	2,3 (L4)
M***	3921	1,78	6	-
N***	3466	1,76	-	-

* posição da cápsula porosa dentro do material aterrado a partir da superfície do lixão

**primeira preparação: condutividade média da água deionizada igual a $1,3 \mu\text{S.cm}^{-1}$

*** segunda preparação: condutividade média da água deionizada igual a $1,5 \mu\text{S.cm}^{-1}$

5.3.3. Instalação dos lisímetros de sucção e acabamento do poço cacimba

Para a amostragem de lixiviado bruto (não diluído) que percola pelo maciço de resíduos do lixão, 6 lisímetros de sucção foram instalados na parede do poço cacimba. A profundidade atingida foi de 3,3 m, a qual foi limitada pelo nível do lençol suspenso de lixiviado (3,5 m) após a conclusão do poço cacimba. Todas as profundidades referentes ao poço cacimba são medidas a partir da superfície do terreno. A instalação dos lisímetros (Figura 17) aconteceu nos dias 05 e 06/11/2012, e também foi manual, executada com auxílio de marreta, trado de 4", cavadeira articulada, tubo de PVC 4" de 1,0 m e baldes.

Figura 17 – Instalação dos lisímetros de sucção na estação experimental do lixão desativado

Primeiramente, a parede do anel de revestimento do poço cacimba foi quebrada para retirada do material sólido das camadas de resíduos aterrados. Essa retirada resultou em buracos de aproximadamente 0,80 m de profundidade, 0,2 m de diâmetro e inclinação de 45° em relação à parede do anel de revestimento. Após alcançar a profundidade desejada, uma camada de 0,10 m de areia lavada foi colocada ao fundo para o encaixe do lisímetro, que foi cuidadosamente empurrado para dentro do furo até a profundidade 0,75 m. Este procedimento garantiu o contato total do meio com a cápsula porosa, para criar uma conexão hidráulica entre o amostrador e o material aterrado. As laterais do lisímetro também foram preenchidas com areia até chegar na parede do anel, que foi reconstituída com massa de concreto magro. A conexão hidráulica e a angulação são cuidados de instalação previstos na norma ASTM 4696 (ASTM, 2008), para permitir o funcionamento adequado do

lisímetro e para garantir a coleta de amostras de um meio menos perturbado e alterado possível.

Nesta fase, uma amostra (Tabela 14) de aproximadamente 1,0 kg da areia utilizada para preenchimento da base e do entorno do lisímetro foi submetida ao ensaio de solubilização, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004). O extrato de solubilização foi submetido a análises de variáveis químicas conforme métodos analíticos descritos em APHA (2012).

Tabela 14 – Identificação das amostras coletadas durante a instalação dos lisímetros

Amostra	Quantidade de amostras	Tipo de amostra	Símbolo	Tipo de dados
Amostra sólida deformada	1	Areia suporte para lisímetros	AL	Obtenção de extratos de solubilização
Extrato de solubilização	1	Líquido extraído das amostras AL	ESA	Variáveis químicas

Os lisímetros foram posicionados nas profundidades 0,15 (L1); 0,65 (L2); 1,15 (L3); 1,65 (L4); 2,15 (L5); 2,65 m (L6) medidas na parede do poço. Entretanto, considerando que o lisímetro penetra 0,75 m no material aterrado a uma angulação de 45°, as posições aproximadas das cápsulas porosas são 0,80 (L1); 1,3 (L2); 1,8 (L3); 2,3 (L4); 2,8 (L5); 3,3 m (L6), a partir da superfície do terreno. Os lisímetros não estão completamente alinhados, pois os furos tomavam a direção da facilidade (ou menor dificuldade) de retirada de resíduos aterrados. Após o término da instalação, os furos e os espaços entre os anéis do poço cacimba foram novamente selados com concreto magro, e os lisímetros foram submetidos a um teste de amostragem para verificação do funcionamento da estação experimental.

5.4. MONITORAMENTO DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL

Pela falta de selagem, sempre há um lençol suspenso de lixiviado dentro do poço cacimba. Em alguns meses, este lençol recebe contribuição da drenagem pluvial da fazenda e do lixão. As chuvas de março de 2013 elevaram bastante o nível do poço cacimba. Então duas amostras desse líquido foram coletadas, uma para análise de todas as variáveis analisadas nas amostras dos lisímetros e outra para análise de contaminantes emergentes, feita pela universidade *Georg-August Universität Göttingen* (Alemanha), através dos métodos descritos em Nödler (2010) realizados

6. Resultados e Discussão

em duplicatas. Ressalta-se que a amostra foi coletada em garrafa plástica, a qual foi transportada refrigerada, mas a mesma foi analisada apenas 30 dias após a coleta. Apesar dessa defasagem na realização da análise, os resultados são apresentados e rapidamente discutidos.

Em decorrência desse nível suspenso, antes de cada coleta, o poço era esvaziado, por uma bomba sapo modelo Anauger 800 ligada ao gerador. O monitoramento da estação experimental consistiu em sete campanhas de amostragem (coleta, filtração, medição *in situ*), precedida de procedimentos de capinação do terreno da entrada de acesso e ao redor da estação, secagem do poço cacimba e preparação do material de coleta. Antes de cada coleta, os frascos de coleta eram previamente limpos com água e sabão e passavam por procedimentos de descontaminação, através do mesmo método usado para a descontaminação dos lisímetros. As campanhas de amostragem aconteceram nas datas 10/12/2012; 31/01/2013; 26/03/2013; 08/05/2013; 29/07/2013; 05/09/2013; 22/01/2014. Ressalta-se que nas amostragens de dezembro/2012, janeiro/2013 e março/2013, amostras brutas de lixiviado (não filtradas em filtro 0,45 μm) também foram coletadas para comparação com as amostras filtradas de lixiviado. Observa-se que apenas para diferenciação, as amostras que não passaram por filtro 0,45 μm são chamadas de amostras brutas. No entanto, sabe-se que o procedimento de coleta através da cápsula porosa do lisímetro de sucção, faz um trabalho de pré-filtração das amostras líquidas, logo não se trata de amostras de lixiviado bruto propriamente dito. Os diferentes tipos de amostras coletadas durante o monitoramento da estação experimental estão descritos na Tabela 15. Todas estas amostras foram individualmente colocadas em garrafas plásticas, armazenadas em freezer a 4°C e submetidas a análises das variáveis químicas conforme métodos analíticos descritos em APHA (2012).

Tabela 15– Identificação das amostras coletadas no monitoramento da estação experimental

Amostra	Quantidade de amostras	Tipo de amostra	Símbolo	Tipo de dados
Amostra do poço cacimba	2	Lençol suspenso de lixiviado	LS	Variáveis químicas e contaminantes emergente
Amostra do lisímetro não filtrada	6 x 3	Lixiviado bruto	N	Variáveis químicas
Amostra do lisímetro filtrada	6 x 7	Lixiviado filtrado	L	Variáveis químicas

5.4.1. Procedimento de amostragem nos lisímetros de sucção

A coleta de lixiviado nos lisímetros de sucção aconteceu conforme o esquema da Figura 15, com a aplicação de uma sucção de -650 mmHg por 10 minutos, em um único sistema de mangueira sem série ligadas aos lisímetros (Figura 18). Este procedimento era repetido de 4 a 6 vezes, até esgotar o lixiviado disponível em cada camada do lixão.

Figura 18 – Amostragem de lixiviado na estação experimental do lixão desativado de São Carlos

Em algumas coletas, alguns lisímetros apresentaram volume coletado reduzido. Neles aplicou-se sucção de -650 mmHg individualmente, na tentativa de extração de maior volume de amostra. Os frascos utilizados são de âmbar, com capacidade de armazenar 250 ml de amostra. O volume total de amostra variava entre

6. Resultados e Discussão

campanhas de amostragem e entre lisímetros. O menor volume coletado foi de 20 mL (na estação seca) e o maior foi de 600 mL (na estação chuvosa), sendo que o volume mínimo para todas as análises químicas é de 400 mL. Logo, em algumas campanhas de amostragem, nem todas as variáveis foram determinadas, devido à restrição do volume de amostra.

5.4.2. Filtração das amostras *in situ*

Com exceção das amostras brutas das 3 primeiras campanhas de amostragem, todas as demais amostras do total das 7 campanhas foram filtradas em campo, com auxílio da bomba a vácuo, passando-as em filtros de acetato de celulose de 0,45 μm (Figura 19). A quantidade de filtros e o tempo de filtração variavam entre as amostras, maior detalhamento na seção 6.3. Ressalta-se que as amostras nomeadas dissolvidas não apresentam apenas partículas dissolvidas. Logo, todo termo “dissolvido” relacionado as amostras analisadas neste trabalho, refere-se simplesmente a amostras filtradas em filtro de 0,45 μm .

Figura 19 – Filtração do lixiviado à vácuo em filtro de 0,45 μm , logo após a coleta

5.4.3. Obtenção de variáveis *in situ*

As variáveis pH, potencial de óxido-redução (ORP), condutividade elétrica (CE), temperatura da amostra e temperatura ambiente foram determinadas *in situ* por equipamentos portáteis, e a alcalinidade por kit de teste rápido (Tabela 16). O medidor

de ORP possui eletrodo combinado de platina, logo o valor -222 mV foi somado a todos os resultados de campo, para obtenção dos valores de Eh (potencial de oxido-redução para o padrão de hidrogênio), conforme recomendação do fabricante DIGIMED.

Tabela 16 – Variáveis medidas em campo durante a amostragem de lixiviado do lixão desativado

Variáveis	Unidade de medida	Limite de detecção	Equipamento
pH	-	-2,0	Digimed DM2P eletrodo DME-CV2
Eh	mV	-1.999	Digimed DM2P eletrodo DMR-CP1
Temperatura da amostra	°C	-20,0	Digimed DM2P eletrodo DME-CV2
Temperatura ambiente	°C	0	Termômetro de mercúrio
Condutividade elétrica	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	0	Hach Sension 156
Alcalinidade	$\text{mg.L}^{-1} \text{CaCO}_3$	10	Kit Hach modelo AL-DT

5.5. DADOS METEOROLÓGICOS

Dados meteorológicos do período de estudo foram fornecidos pela estação meteorológica automática (Tabela 17), instalada na Fazenda Canchim da Embrapa, distante a aproximadamente 14 km do lixão Santa Madalena.

Tabela 17 – Dados meteorológicos do período de instalação e de monitoramento do experimento

Mês	Dados Médios						
	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)			Chuva (mm)
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Total
Jun 2011	16,3	23,7	11,4	74,7	97,6	38,7	46,4
Jul 2011	17,9	25,9	12,3	70,4	91,7	38,5	0,0
Jul 2012	16,7	24,8	11,2	76,3	96,1	41,1	34,6
Nov 2012	22,2	29,1	17,3	76,4	95,0	48,7	219,0
Dez 2012	23,6	30,4	19,2	82,6	98,3	53,1	360,6
Jan 2013	22,0	28,3	18,1	85,2	98,0	59,0	282,8
Fev 2013	22,5	29,6	18,4	84,2	98,9	53,9	200,0
Mar 2013	22,1	28,4	18,0	85,2	98,3	58,5	205,2
Abr 2013	20,2	27,0	15,7	81,1	97,2	52,2	51,4
Mai 2013	18,8	25,5	14,0	80,4	97,3	51,6	153,6
Jun 2013	18,3	24,9	14,1	85,5	98,8	57,4	62,0
Jul 2013	16,6	24,4	11,5	79,6	97,5	47,5	27,8
Ago 2013	17,7	26,6	11,2	68,8	91,5	35,0	4,4
Set 2013	20,1	27,8	14,2	69,3	91,2	40,5	62,6
Out 2013	20,7	27,6	15,6	76,1	94,5	48,5	147,6
Nov 2013	21,9	28,8	17,2	80,0	96,8	51,9	199,0
Dez 2013	23,1	29,7	18,7	81,3	96,8	53,1	91,6
Jan 2014	24,1	31,9	18,6	73,9	95,6	41,2	79,2

(Fonte: EMBRAPA, 2014)

5.6. CONTROLE DOS POÇOS DE MONITORAMENTO

O monitoramento dos poços consistiu em quatro campanhas de amostragem, com medição de nível e de algumas variáveis *in situ* (Tabela 18). Como o lixão desativado de São Carlos está praticamente abandonado, os poços de monitoramento distribuídos em sua área são de difícil acesso. Portanto, os poços amostrados foram escolhidos conforme sua disposição em relação ao maciço e conforme a menor dificuldade de acesso a eles. As campanhas de amostragem aconteceram nas datas 06/12/2012; 25/02/2013; 19/04/2013; 01/07/2013, nos poços PM03 (poço de montante), PM 29 (dentro do maciço) e PM17, PM19, PM23 (poços de jusante).

Tabela 18 – Variáveis medidas em campo durante a amostragem de água subterrânea

Variáveis	Unidade de medida	Limite de detecção	Equipamento
pH	-	-2,0	Digimed DM2P eletrodo DME-CV2
Nível estático do lençol	m	0	Medidor de nível Hidrosuprimentos
Temperatura da amostra	°C	-20,0	Digimed DM2P eletrodo DME-CV2
Temperatura ambiente	°C	0	Termômetro de mercúrio
Condutividade elétrica	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	0	Hach Sension 156

5.6.1. Procedimento de amostragem nos poços de monitoramento

As amostras de água subterrânea foram coletadas segundo a NBR 15.847 (ABNT, 2010b), através de *bailers* (Figura 20). O maior cuidado tomado para esta amostragem foi descer e subir lentamente o amostrador no poço, para evitar a suspensão de sólidos e a coleta de amostras não representativas.

Figura 20 – Amostragem de água subterrânea na área do lixão desativado

As amostras coletadas durante o monitoramento dos poços estão identificadas separadamente na Tabela 19.

Tabela 19 – Identificação das amostras coletadas no monitoramento dos poços de monitoramento

Amostra	Quantidade de amostras	Tipo de amostra	Símbolo	Tipo de dados
Amostra do poço de monitoramento	1 x 4	Água subterrânea a montante do lixão	M	Variáveis químicas
Amostra do poço de monitoramento	1 x 4	Água subterrânea abaixo do lixão	D	Variáveis químicas
Amostra do poço de monitoramento	3 x 4	Água subterrânea a jusante do lixão	J	Variáveis químicas

Todas as amostras de água subterrânea foram individualmente colocadas em garrafas plásticas, armazenadas em freezer a 4°C e submetidas a análises de variáveis químicas conforme métodos analíticos descritos em APHA (2012).

5.7. ANÁLISES LABORATORIAIS

As análises com as amostras de solo indeformada (ASI) e deformadas (ASD) foram realizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos (SGS/EESC/USP). Todas as demais amostras foram preparadas (ensaio de solubilização, preservação e/ou digestão) e analisadas no Laboratório de Saneamento (SHS/EESC/USP). As variáveis analisadas em cada tipo de amostra estão apontadas na Tabela 20.

Duas observações foram consideradas para as análises de DQO e DBO em amostras de lixiviado. Segundo APHA (2012), não se deve usar o método convencional para medir a DQO de amostras com mais de 2.000 mg.L⁻¹ de cloreto. Todas as amostras de lixiviado apresentaram concentrações de cloreto menores que 1.000 mg.L⁻¹, portanto, a DQO foi analisada normalmente, sem a necessidade de precipitação de cloretos. Para a determinação da DBO₅, a água de diluição usada nos ensaios sempre foi preparada com semente, segundo a NBR 12.614 (ABNT, 1992b). A finalidade da semente é introduzir uma população biológica capaz de oxidar a matéria orgânica biodegradável da amostra. Na presença de microrganismos na amostra, como no caso de esgoto sanitário, água de superfície e alguns efluentes não clorados, não é preciso empregar semente. Devido à presença de pequenas quantidades de microrganismos nas amostras de lixiviado foi preciso empregar

6. Resultados e Discussão

semente (preparada com efluentes da estação de tratamento de esgoto da USP/São Carlos).

Tabela 20 – Variáveis analisadas em cada tipo de amostra

Amostra	Tipo	Quantidade de amostras	Variáveis analisadas
ASI	Solo	1	Condutividade hidráulica
ASD	Solo	4	Granulometria
ASA	Sólidos	15	Umidade, ST ⁸ , STF ⁹ , STV ¹⁰
CI	Chorume imóvel	14	PO ₄ , compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , COD ⁴ , DQO ⁵ , DBO ₅ ⁶ e variáveis de campo ⁷
LS	Lixiviado suspenso	2	PO ₄ , compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , COD ⁴ , DQO ⁵ , DBO ₅ ⁶ e variáveis de campo ⁷
ES	Extrato de solubilização do material aterrado	14	PO ₄ , SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ , pH, cátions e ânions ² , metais pesados ³ , DQO ⁵
ESB	Extrato de solubilização da base do lixão	2	SiO ₂ , compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , COD ⁴ , DQO ⁵ e variáveis de campo ⁷
ESA	Extrato de solubilização da areia dos lisímetros	1	SiO ₂ , compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , COD ⁴ , DQO ⁵ e variáveis de campo ⁷
PC	Lixiviado suspenso	2	SiO ₂ , F ⁻ , Cl ⁻ , PO ₄ , contaminantes emergentes, compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , DQO ⁵ , DBO ₅ ⁶ , pH e CE
N	Lixiviado bruto	6 x 2	SiO ₂ , F ⁻ , Cl ⁻ , PO ₄ , compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , DQO ⁵ , DBO ₅ ⁶ e variáveis de campo ⁷
L	Lixiviado filtrado	6 x 7	SiO ₂ , F ⁻ , Cl ⁻ , PO ₄ , compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , COD ⁴ , DQO ⁵ , DBO ₅ ⁶ e variáveis de campo ⁷
M D J	Água subterrânea a montante (M), dentro (D) e a jusante (J) do lixão	5 x 4	E.coli, Cl ⁻ , PO ₄ , SO ₄ , compostos nitrogenados ¹ , cátions ² , metais pesados ³ , DQO ⁵ , DBO ₅ ⁶ e variáveis de campo ⁷

¹compostos nitrogenados: NTK, NAT, NO₂, NO₃; ²cátions: Na, K, Ca, Mg, Sr, Ba, Al, Fe e Mn; ³metais pesados: Ag, Cd, Pb, Co, Cr, Ni, Cu e Zn; ⁴COD: carbono orgânico dissolvido; ⁵DQO: demanda química de oxigênio; ⁶DBO₅: demanda bioquímica de oxigênio; ⁷variáveis de campo: pH, condutividade elétrica (CE), alcalinidade; ⁸ST: sólidos totais; ⁹STF: sólidos totais fixos; ¹⁰STV: sólidos totais voláteis.

Para o controle de qualidade, todas as variáveis analisadas em laboratório tiveram brancos equando a quantidade de amostra permitia, realizou-se a análise em duplicatas. Observa-se que para os metais, a digestão do branco foi separada da digestão das amostras para evitar contaminação do branco. A coloração escura de algumas amostras – principalmente de chorume imóvel – dificultou alguns procedimentos analíticos, como por exemplo, as análises de fosfato e de nitrato. Estas amostras foram analisadas em diferentes diluições para determinação da concentração final. A diluição neutralizou o efeito da cor para não interferir a leitura das análises espectrofotométricas. O detalhamento sobre as diluições das amostras usadas neste trabalho foi apresentado no Apêndice D. Por garantia, as variáveis mensuradas em campo também foram analisadas nas amostras em laboratório e os resultados foram comparados. Os resultados dos procedimentos de garantia e de

controle de qualidade das análises indicaram que os resultados analíticos são satisfatórios para o presente estudo.

As análises químicas seguiram os critérios dos métodos analíticos descritos em APHA (2012), apontados individualmente na Tabela 21.

Tabela 21 – Métodos usados para determinação das variáveis químicas

Variáveis	Método*	Limite de detecção
pH	4500 H ⁺ (B)	0
Eh - potencial redox (mV)	2580 (B)	0,1
Temperatura (°C)	2550 (B)	-20,0
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	2320 (B)	1,0
CE - condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	2510 (B)	0,1
NTK - nitrogênio total Kjeldahl (mg N.L ⁻¹)	4500 N _{org}	0,1
N-NH ₃ nitrogênio amoniacal (mg N-NH ₃ .L ⁻¹)	4500 NH ₃ (C)	0,1
NO ₂ - Nitrito (mg N-NO ₂ .L ⁻¹)	4500 NO ₂	0,001
NO ₃ - Nitrato (mg N-NO ₃ .L ⁻¹)	4500 NO ₃	0,01
DQO - demanda química de oxigênio (mg O ₂ .L ⁻¹)	5220 (D)	1,0
DBO ₅ - demanda bioquímica de oxigênio (mg O ₂ .L ⁻¹)	5210 (B)	1,0
COD - carbono orgânico dissolvido (mg C.L ⁻¹)	5310 (B)	0,4
SiO ₂ - sílica total (mg.L ⁻¹)	4500-SiO ₂ (C)	0,1
PO ₄ - fosfato total (mg.L ⁻¹)	4500-P (E)	0,1
SO ₄ - sulfato (mg.L ⁻¹)	4500-SO ₄ (E)	1,0
Cl ⁻ - cloreto (mg.L ⁻¹)	4500 Cl ⁻ (D)	0,1
F ⁻ - fluoreto (mg.L ⁻¹)	4500 F ⁻ (D)	0,01
E. coli (quantidade.100ml ⁻¹)	9223 (B)	1,0
Na (mg.L ⁻¹)**	3500 Na ⁺ (B)	0,1
K (mg.L ⁻¹)**	3500 K ⁺ (B)	0,1
Mg (mg.L ⁻¹) ***	3111 (B)	0,001
Al (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,01
Ba (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,005
Ca (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,001
Sr (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,001
Ag (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,001
Cd (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,0006
Pb (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,01
Co (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,007
Cr (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,005
Ni (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,008
Cu (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,003
Fe (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,005
Mn (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,003
Zn (mg.L ⁻¹)***	3111 (D)	0,002

*métodos descritos em APHA (2012); **fotometria com amostra digerida; ***espectrofotometria de absorção atômica com chama

Os metais, cátions e ânions analisados foram determinados em sua totalidade, por exemplo, os resultados de Fe são referentes ao ferro total. Por este motivo, os elementos químicos são apresentados e discutidos sem valência na maioria do texto desta tese. A indicação do estado de oxidação dos elementos é realizada apenas em situações de discussão mais específica. O estado de oxidação dos prováveis elementos existentes no maciço e no lixiviado foram obtidos a partir de uma avaliação de especiação química realizada pelo *software* PHREEQC para *Windows*. Este programa é uma ferramenta de modelagem geoquímica disponível gratuitamente e

desenvolvido por David Parkhurst e Tony Appelo. O resultado da especiação química, referente a campanha de amostragem de setembro de 2013, é apresentado no Apêndice G.

5.8. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Para garantia de qualidade e controle de qualidade (QA/QC) dos resultados analíticos, para cada variável analisada em laboratório, era feito um branco para análise padrão com água deionizada. A análise no branco auxilia na verificação de possíveis contaminações das amostras. Todos os equipamentos do laboratório que necessitam calibração são diariamente calibrados e possuem planilha de controle. A vidraria usada nas análises, mesmo após lavagem padrão do laboratório, era lavada novamente com água deionizada. Todos os reagentes utilizados eram manipulados pela equipe de trabalho do laboratório para garantia do controle e da obtenção da normalidade e da concentração desejada. Quando o volume das amostras era superior a 400 mL, algumas variáveis eram escolhidas para realização de análises em duplicatas, e o resultado final neste caso era a média dos dois resultados. Na primeira campanha de análises do lixiviado coletado nos lisímetros, várias diluições com as amostras foram testadas, para eliminar a interferência da cor nos resultados finais. Observou-se que para a sílica (SiO_2) não houve resultados coerentes para amostras diluídas, logo todos os resultados obtidos da diluição foram descartados. As variáveis mensuradas em campo eram novamente medidas nos aparelhos do laboratório, para comparação da ordem de grandeza e eliminação de possíveis erros de leitura.

As concentrações das amostras brutas e filtradas no lixiviado foram comparadas através do cálculo de coeficientes de variação em porcentagem (desvio padrão.média⁻¹.100). A concentração dos extratos de solubilização foram convertidas de mg.L⁻¹ para mg.kg⁻¹ através da equação adaptada (equação 1) de (PRECHTHAI et al., 2008):

$$M = \frac{C \times V}{S} \times 1000 \quad (1)$$

Onde: M é a concentração final em mg.kg⁻¹

C é a concentração medida no extrato em mg.L⁻¹

V é o volume final do extrato de solubilização (1 litro)

S é a massa de sólidos usada no processo de solubilização (250 g)

Para verificação dos resultados a serem usados nas interpretações hidroquímicas, cálculos de balanço iônico foram realizados conforme a equação 2. Este método indica possíveis erros nos resultados analíticos, baseados no equilíbrio químico de cátions e ânions maiores, expressos em meq.L⁻¹.

$$E = \frac{\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions}}{\sum \text{cátions} + \sum \text{ânions}} \times 100 \quad (2)$$

Para o estudo realizado, o balanço iônico foi considerado apenas nas amostras filtradas de lixiviado. Os íons usados para o cálculo do balanço foram Cl⁻, PO₄³⁻, F⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Mn²⁺ e Fe²⁺. Adotou-se como critério para eliminação das análises o erro calculado pelo balanço iônico superior a vinte por cento (E > 20%).

Os resultados foram representados por diagramas de Stiff, os quais apresentam as principais características hidroquímicas do lixiviado nas diferentes camadas de resíduos e ao longo do tempo (incluindo meses secos e chuvosos). Para a sua elaboração são utilizados quatro eixos horizontais paralelos, que se estendem nas duas direções a partir de um eixo central vertical. Concentrações em meq.L⁻¹ de cátions são plotadas à esquerda do eixo central vertical, e as concentrações de ânions, também em meq.L⁻¹ são plotadas à direita deste eixo (Figura 21). Duas bases diferentes do diagrama de Stiff foram usadas, pois por se tratar de amostras de lixiviado, optou-se por incluir o nitrogênio amoniacal em um dos diagramas. Os pontos são então conectados, resultando em um polígono irregular para avaliação da qualidade da amostra.

Figura 21 – Bases do diagrama de Stiff, representação gráfica da composição hidroquímica de uma amostra

Os resultados de qualidade dos resíduos, do solo abaixo do maciço do lixão e da areia usada como suporte para os lisímetros foram comparados com os valores

máximos do Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) para os extratos de solubilização, os quais são usados como parâmetros para classificar os resíduos como inertes. A classificação dos resíduos aterrados foi obtida através da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os resultados de qualidade do chorume imóvel, do lixiviado do lençol suspenso e do lixiviado do maciço do lixão foram comparados com os valores máximos permitidos para lançamento de efluentes em rios de Classe 2 do Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Os resultados de qualidade das águas subterrâneas foram comparados com os valores Portaria nº 2.914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011) e com os valores de intervenção para águas subterrâneas das Decisões de Diretoria nº 195 e nº 045 (CETESB, 2005, 2014a). Para a determinação da fase do aterro, os resultados de qualidade do lixiviado foram comparados com os valores de referência das diferentes fases do aterro sintetizados por Ehrig (1988) e por Souto e Povinelli (2011).

Para verificar a influência entre elementos químicos (efeitos de antagonismo e sinergismo), obteve-se matrizes de correlação de Pearson. Os resultados foram interpretados como correlação muito forte para coeficientes $p \geq 0,90$; correlação forte para $0,70 \leq p \leq 0,89$; correlação média para $0,49 \leq p \leq 0,69$ (DANCEY; REIDY, 2005).

A abordagem para previsão dos possíveis ambientes hidrogeoquímicos nas águas subterrâneas da região foi criada para este estudo, porém foi fundamentada nos conceitos e critérios apresentados por Fetter (1999) e Christensen et al. (2001).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO DE RESÍDUOS DO LIXÃO DESATIVADO

A caracterização do maciço foi baseada nas características observadas durante escavação do poço cacimba dentro do maciço e nas análises das amostras sólidas e líquidas coletadas nesta etapa. O maciço de qualquer depósito de resíduo tem caráter heterogêneo devido à diversidade dos materiais descartados. Esta diversidade também pode ser atribuída ao desenvolvimento dos setores industrial e comercial, uma vez que novos produtos são criados para melhorar ou substituir insumos antigos. No perfil avaliado, por exemplo, apenas duas embalagens do material tetrapak foram encontradas (consequência ou da baixa comercialização de produtos em embalagens tetrapak nas décadas de 1980 e 1990 ou da descaracterização do material nos processos de decomposição e lixiviação do maciço); percebeu-se também que na camada de 1985 não havia embalagens do tipo PET (segundo a ABIPET (2010), estas embalagens começaram a ser consumidas no Brasil na década de 1990) e; que em todas as camadas havia muitas latas de óleo de cozinha, as quais não são mais utilizadas (as latas de óleo foram substituídas por embalagens plásticas que são mais inertes e seguras para o armazenamento do produto por longos períodos).

Considerando o diâmetro e a profundidade do poço cacimba, 12,3 m³ de material aterrado e compactado foram removidos. A escavação descompactou o material resultando em três caçambas de 5 m³, as quais foram descarregadas no atual aterro sanitário do município. A maior parte dos resíduos aterrados não estava totalmente descaracterizada e era constituída por resíduos domésticos. Além destes, resíduos de serviços de saúde, resíduos de poda e capina (como folhas e galhos), resíduos de construção e demolição, resíduos de oficina mecânica também foram identificados.

6.1.1. Características gerais do maciço de resíduo

Estruturalmente, o perfil avaliado (Figura 22) era composto por 4 camadas de cobertura de solo e camadas de resíduos depositados em 4 diferentes anos (1985, 1991, 1994 e 1995). As datas do perfil são coerentes com a descrição das regiões dos anos de deposição da Figura 3. O perfil avaliado está posicionado entre os poços L31 e L32, mais próximo deste último.

Figura 22 – Estrutura aproximada do perfil escavado no maciço do lixão desativado de São Carlos

Os resultados de granulometria (Figura 23) e os aspectos visuais das amostras de solo confirmaram que solos com características variadas, possivelmente de diferentes fontes, foram usados para cobrir os resíduos. Um maior teor de argila foi encontrado nas camadas 3 e 4, o que pode ser atribuído a presença de óleos e graxas (OG) e de material coloidal nas amostras sólidas submetidas ao ensaio.

6. Resultados e Discussão

Figura 23 – Curvas de distribuição granulométrica dos solos usados nas camadas de cobertura do lixão desativado de São Carlos

As camadas de solo e de resíduos estavam mal adensadas e possuíam espessuras não padronizadas. As camadas inferiores apresentavam-se mais compactadas do que as superiores devido ao peso da sobreposição das camadas. Esta falha na compactação pode ter aumentado os espaços vazios dentro do maciço, o que permitiu maior entrada e armazenamento de água, contribuindo inclusive para a existência de lençóis suspensos de lixiviado (KOERNER; SOONG, 2000).

6.1.2. Composição do conteúdo aterrado

A composição gravimétrica dos RSU do lixão desativado de São Carlos/SP foi alterada com o tempo. Esta mudança foi identificada por Abreu (2013), a partir da classificação de aproximadamente 100 kg de amostras de resíduos aterrados, removidos durante a escavação do poço cacimba. A autora coletou amostras das profundidades 0,7 até 1,5 m – resíduos depositados em 1995 – e das profundidades 6,5 até 7,0 m – resíduos depositados em 1985. Para comparação, na Figura 24, o percentual de matéria orgânica de Gomes (1989) foi reclassificado como fração < 19 mm e, os percentuais de alguns materiais não especificados anteriormente (madeira,

têxteis, borracha, pedras) de Abreu (2013) foram agrupados com a fração outros. As principais alterações na composição gravimétrica identificadas nos resíduos aterrados foram: (1) a diminuição das frações < 19 mm e papel e (2) o aumento das frações mais inertes (plástico, vidro, metais e outros).

Figura 24 – Comparação da composição gravimétrica de amostras de resíduos aterrados nas camadas de 1996 e 1985, calculada por Abreu (2013) e da composição gravimétrica de amostras de resíduos de São Carlos antes do aterramento, calculada por Gomes (1989). Todas as amostras são amostras de resíduos do lixão Santa Madalena

Em geral, esta alteração na composição pode ser atribuída à decomposição e à lixiviação dos resíduos, que diminuem o tamanho das frações sólidas e convertem parte delas para frações líquidas e gasosas. A compactação das frações compostas por materiais compressíveis também pode auxiliar nestas alterações. O aumento das frações inertes mostra que estes materiais (plástico, vidro, metais, borracha, têxteis) são resistentes aos processos de lixiviação e às variações ambientais ocorrentes no maciço (diminuição de oxigênio, umidade, acidez etc.). Os 7% da fração papel é referente a grandes quantidades de papéis secos e conservados encontradas dentro do maciço, na camada de 1985. Esta constatação comprova a hipótese de Rosqvist et al. (2005), sobre a existência de um fluxo heterogêneo de água dentro do maciço de resíduos, mesmo em depósitos que recebem grandes volumes de água de fontes externas.

O plástico constituía a maior parte do volume total removido. Esta grande quantidade e seu arranjo desordenado no maciço pode ser um dos principais responsáveis por esta heterogeneidade no fluxo de água. A retirada de amostras indeformadas ao longo do perfil com equipamentos convencionais não foi possível devido ao plástico. Durante a escavação, consideráveis quantidades de chorume imóvel – um líquido estagnado de cor escura, de forte odor e com altas concentrações de poluentes – foram encontradas sobre os resíduos plásticos (Figura 25). Portanto, observou-se que no caso de lixões e aterros controlados, os resíduos plásticos assumem despropositadamente a função de impermeabilização parcial do terreno, evitando o lançamento de elevadas cargas de poluente ao meio ao conter e armazenar grandes quantidades de chorume imóvel dentro do maciço.

Figura 25 – Chorume imóvel: líquido estagnado encontrado sobre os resíduos.

6.1.3. Qualidade e classificação do conteúdo aterrado

Dentro do maciço de resíduos foram observadas frações de material sólido (resíduos e solo) e de material líquido (chorume imóvel), as quais foram coletadas e analisadas separadamente. O odor de todo perfil era uniformemente forte e semelhante ao odor das amostras sólidas e líquidas. Por outro lado, a cor das camadas de resíduos e do chorume imóvel escurecia com o avanço da profundidade

de escavação. As camadas de solo mantinham cores próprias como podem ser vistas nas amostras nº 1, 5a, 9 e 12 da Figura 26, estas foram coletadas das camadas de solo 1, 2, 3 e 4, respectivamente. As demais amostras são resíduos misturados com húmus – substância responsável pela coloração escura das amostras – e solo.

Figura 26 – Amostras do material aterrado no maciço de lixão desativado e as respectivas profundidades de onde foram coletadas

O húmus compreende substâncias não húmicas e substâncias húmicas (LANGRAF; MESSIAS; REZENDE, 2005). As substâncias não-húmicas são facilmente degradadas pelos microrganismos e suas concentrações instantâneas são normalmente baixas (aminoácidos, carboidratos, proteínas, ácidos orgânicos, gorduras, pigmentos e outros compostos de baixa massa molar). As substâncias húmicas (SH) são componentes de coloração escura e de estrutura química complexa, os quais compõem um grupo de compostos heterogêneos e mais persistentes (alguns compostos orgânicos xenobióticos, ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, componentes com alta massa molar). Enfim, o húmus é produto da decomposição orgânica que possui papel relevante na complexação e precipitação de metais, e no controle de acidez do ambiente (COTTA et al., 2007).

De acordo com Qasim e Chiang (1994), os estágios iniciais de decomposição produzem uma grande quantidade de calor, o que eleva a temperatura do maciço a

6. Resultados e Discussão

temperaturas maiores que 30°C. No estudo de Gomes (1989), a temperatura dos resíduos recém-aterrados estava na faixa de 35 a 37°C. Atualmente, a temperatura dos resíduos aterrados está na faixa de 20 a 21°C. Este resultado serviu como um dos principais indicadores de que o lixão Santa Madalena está em um estágio avançado de decomposição. Apesar da produção de energia e biomassa pela digestão anaeróbia ser relativamente pequena e não aumentar a temperatura do maciço, os resíduos são bons isolantes térmicos e esse efeito faz com que as maiores variações de temperatura ocorram nas zonas superiores do aterro, por estarem mais sujeitas à influência da temperatura ambiente (EHRIG, 1983). Logo, quanto mais afastado da superfície, menores as variações de temperatura. Isto foi verificado no maciço do lixão Santa Madalena, em que a amostra do solo da cobertura final apresentou o mesmo valor da temperatura ambiente. Nas demais amostras, observou-se que a temperatura do perfil não era dependente da temperatura ambiente (Tabela 22), nem nas amostras sólidas e nem nas amostras líquidas.

Tabela 22 – Características físicas, frações inorgânicas (STF) e frações orgânicas (STV) remanescentes no maciço do lixão desativado, a partir das amostras sólidas do maciço

Ano	Amostra	Prof. m	T _{amb} °C	T _{amo} °C	pH	Umidade %	STF %	STV %
1995	1	0,2	16	16	6,8	12	98	2
	2	0,8	27	20	7,9	58	72	28
	3	1,3	25	20	8,2	72	67	33
	4	1,8	14	20	8,2	50	84	16
	5a	2,1	18	20	8,0	60	83	17
	5b	2,5	18	20	8,1	63	73	27
1994	6	2,7	19	21	8,1	43	88	12
	7	3,3	21	21	8,1	78	59	41
	8	3,8	29	21	8,2	39	89	11
1991	9	4,3	24	21	8,0	37	89	11
	10	4,6	24	21	7,7	21	95	5
	11	5,4	24	21	8,1	50	70	30
1988	12	5,8	30	21	8,0	42	83	17
1985	13	6,4	28	21	8,1	55	77	23
	14	6,9	27	21	8,0	68	71	29

Nota: Prof = profundidade coletada, T_{amb} = temperatura ambiente no momento da coleta, T_{amo} = temperatura da amostra no momento da coleta, ST = sólidos totais, STF = sólidos totais fixos, STV = sólidos totais voláteis

As camadas de resíduos apresentaram maior umidade do que as camadas de solo. Em geral o maciço apresentou umidade média de 50%, mesmo na ausência de chuvas (condição climática durante a coleta destas amostras), próxima à umidade de 54% dos resíduos recém-aterrados de Gomes (1989). O chorume imóvel também é responsável pelo alto teor de umidade, pois não era possível separar ele das amostras sólidas. É interessante notar que não é verdadeiro afirmar que as camadas que ficam

abaixo do nível de lixiviado suspenso (3,5 m) são mais úmidas. O pH dos resíduos recém-aterrados medido por Gomes (1989) era ácido. Com exceção da camada mais superficial que apresentou pH neutro (por contribuição do pH ácido das chuvas), os resíduos aterrados, 18 anos após o encerramento do lixão, possuem pH levemente alcalino (entre 7,7 e 8,2) ao longo de todo o perfil. Esta faixa de pH é outra forte evidência de que o lixão está fase metanogênica da decomposição.

Sólidos totais voláteis (STV) incluem materiais degradáveis (celulose, hemicelulose etc.) e recalcitrantes (lignina, plásticos etc.) (MEHTA et al., 2002). Percentual de STV elevado indica presença de matéria orgânica ainda não degradada. Gomes (1989) encontrou valores máximos entre 52 a 58% de STV, porque os resíduos aterrados analisados ainda estavam pouco degradados. Mas na amostra de resíduos da camada de 1994 foi encontrado um valor de STV > 40%, que é relativamente alto para resíduos em estágio avançado de decomposição. Este resultado pode ser atribuído ao tempo de exposição a céu aberto das camadas de resíduos. A camada de 1985 ficou 6 anos exposta (sendo que nos 3 últimos anos foi coberta por uma fina camada de solo) antes de receber uma sobreposição de resíduos; a camada de 1991 ficou 3 anos exposta e a camada de 1994 ficou exposta menos de 1 ano. Este menor período de exposição ao oxigênio antecipou condições anaeróbias na camada de 1994, que promovem uma decomposição mais lenta em comparação com a decomposição em condições aeróbias. Os experimentos que comparam a eficiência da decomposição de resíduos em condições aeróbias e anaeróbias sempre resultam em maiores taxas de remoção de carga orgânica em ambientes oxigenados (SANPHOTI et al., 2006). Contudo, em todas as camadas, a fração inorgânica sempre apresentou maior que a fração orgânica. Este resultado era esperado devido à idade do depósito de resíduos que já passou por evidente processo de degradação. Entretanto, a variável STV não é frequentemente usada, pois as frações de solo e plástico são contabilizadas no ensaio e estes materiais aumentam consideravelmente o percentual de sólidos totais fixos (STF), abaixando o real teor da fração orgânica dos resíduos (ATTAL et al., 1992; MEHTA et al., 2002; KELLY et al., 2006). Esta desvantagem foi comprovada com as maiores frações inorgânicas (STF) encontradas nas amostras 1, 5a, 6, 8, 9, 12 – que eram compostas ou por solo ou por resíduos com grandes quantidades de solo.

O processo de solubilização dos resíduos em água deionizada faz a mobilização de metais e de componentes iônicos do material sólido para o extrato de

6. Resultados e Discussão

solubilização, sempre em pH neutro (situação mais próxima ao ambiente natural do maciço). O processo de lixiviação dos resíduos, em laboratório, retrata uma mobilização forçada dos componentes ao diminuir bruscamente o pH do meio, situação muito improvável em depósitos de resíduos antigos. Aqui cabe uma crítica sobre a falta de padronização dos métodos porque o processo mais usado para avaliação da mobilização de poluentes da massa aterrada é a trituração e a lixiviação dos resíduos, como exemplo apresentado em PRECHTHAI et al. (2008) e, pessoalmente, encaro como uma escolha equivocada de metodologia. A comparação dos resultados deste estudo a partir da solubilização com os resultados de um estudo a partir da lixiviação mostra que o conteúdo mobilizado em condições naturais é muito menor do que é apresentado pelos resultados do ensaio de lixiviação.

Sobre os metais pesados, com exceção das concentrações de Cd e Ag – que apresentaram, respectivamente, concentrações similares em todo o perfil e abaixo do limite de detecção – os demais resultados variaram bastante em relação à profundidade de coleta. A camada de 1994 apresentou maior quantidade de metais com concentrações acima da média do perfil (valores com sombreamento na Tabela 23), isto pode indicar a complexação ou a adsorção dos metais às frações orgânicas remanescentes, comprovadamente significativas nesta camada.

Tabela 23 – Concentrações de metais pesados nos extratos de solubilização obtidos a partir das amostras sólidas do maciço do lixão desativado

Ano	Amostra	Prof. m	Concentração de metais pesados (mg.kg ⁻¹)							
			Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Cr	Co	Ag
1995	1	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,1	Nd	0,1	nd
	2	0,8	0,3	0,5	0,2	1,1	nd	0,1	0,1	nd
	3	1,3	0,4	0,3	0,2	0,8	nd	Nd	0,1	nd
	4	1,8	0,4	0,2	0,2	0,9	nd	0,2	0,1	nd
	5a	2,1	0,4	0,4	0,2	0,6	nd	Nd	0,2	nd
	5b	2,5	1,1	0,8	0,2	0,9	1,1	0,7	0,3	nd
1994	6	2,7	0,8	0,6	0,2	1,0	0,4	0,3	0,3	nd
	7	3,3	0,7	0,7	0,2	1,2	nd	0,6	0,3	nd
	8	3,8	1,0	0,6	0,2	1,1	0,5	0,7	0,3	nd
1991	9	4,3	0,4	0,4	0,2	0,5	nd	Nd	0,1	nd
	10	4,6	0,4	0,2	0,1	0,7	0,2	0,3	0,1	nd
	11	5,4	0,6	0,4	0,2	0,9	nd	0,8	0,1	nd
1988	12	5,8	0,4	0,3	0,2	0,8	nd	0,4	0,0	nd
1985	13	6,4	1,2	0,7	0,2	1,3	0,9	0,2	0,1	nd
	14	6,9	0,3	0,3	0,2	0,7	nd	Nd	nd	nd

Nota₁: Prof = profundidade coletada; nd = valor abaixo do limite de detecção; o sombreamento marca os valores que ficaram acima da média do perfil

Os metais pesados encontrados no conteúdo sólido do maciço, com base nas concentrações médias do perfil, encontram-se da maior para a menor concentração

na seguinte ordem: Ni>Zn>Pb>Cr>Cu>Cd>Co>Ag. Observa-se que as concentrações dos metais Ni, Zn, Pb e Cd detectadas no conteúdo sólido são semelhantes às concentrações destes metais no lixiviado, indicando significativa mobilização através da lixiviação natural do conteúdo sólido do maciço. As concentrações de Cr e Cu no lixiviado são menores que as concentrações do conteúdo sólido, indicando baixa mobilização destes elementos. Por outro lado, o lixiviado apresentou concentrações de Co e Ag maiores do que as detectadas no conteúdo sólido, indicando que para mobilizá-los é necessário processos mais complexos ou que há um aporte destes elementos de outra fonte, além da lixiviação do maciço.

As concentrações de todos os componentes iônicos – que foram avaliados nas amostras sólidas – variaram em profundidade. Como a variação das concentrações variou bastante entre as camadas, a média ficou amortizada, fazendo com que todas as camadas apresentassem concentrações maiores que as médias (valores com sombreamento laranja na Tabela 24).

Tabela 24 – Concentrações de íons nos extratos de solubilização obtidos a partir das amostras sólidas do maciço do lixão desativado

Ano	Amostra	Prof. m	Concentração de íons (mg.kg ⁻¹)									
			Na	K	Ca	Mg	Sr	Ba	Al	Fe	Mn	PO ₄
1995	1	0,2	1504	806	33	4220	0,1	nd	180	150	0,5	3
	2	0,8	215	190	1240	70	1,4	0,6	nd	3	1,1	2
	3	1,3	319	274	350	65	0,7	0,4	nd	8272	0,6	5
	4	1,8	176	152	182	24	0,4	0,1	1	3	0,8	2
	5a	2,1	545	323	150	15148	0,3	0,3	17	14736	0,4	10
	5b	2,5	734	440	162	24	0,3	0,3	29	31	0,2	18
1994	6	2,7	777	487	152	19	0,3	nd	93	80	0,4	36
	7	3,3	1196	609	223	28	0,5	nd	nd	12724	1,0	16
	8	3,8	305	216	118	10028	0,2	0,6	1	68	0,5	12
1991	9	4,3	361	128	123	5952	0,2	nd	45	35	0,2	2
	10	4,6	152	68	24	3	nd	nd	152	120	0,3	1
	11	5,4	402	190	316	38	0,4	nd	8	13460	0,2	4
1988	12	5,8	620	380	259	28	0,7	nd	nd	6156	0,9	2
1985	13	6,4	624	282	141	14316	0,3	nd	79	58	0,4	8
	14	6,9	632	395	259	48	0,5	nd	nd	8872	0,4	6

Nota₁: Prof = profundidade coletada; nd = valor abaixo do limite de detecção; o sombreamento marca os valores que ficaram acima da média do perfil

As concentrações de SO₄, NO₃ e NO₂ estavam sempre abaixo do nível de detecção, resultado consistente para as condições anaeróbias do maciço. Observa-se que as maiores concentrações do íon fosfato foram encontradas nas camadas centrais do perfil avaliado, entre 2,0 a 4,0 m. Com base nas concentrações médias, estes componentes encontram-se no conteúdo sólido do maciço, da maior para a menor concentração, na seguinte ordem: Fe>Mg>Na>K>Ca>Al>Sr>Mn>Ba.

Concentrações elevadas de Fe, Ca, Mg, K e Na foram encontradas no lixiviado, indicando significativa mobilização destes através da lixiviação do maciço. As concentrações de Al no lixiviado são menores que as concentrações do conteúdo sólido, indicando baixa mobilização deste elemento. Por outro lado, o lixiviado apresentou concentrações de Mn, Sr e Ba maiores do que as detectadas no conteúdo sólido, indicando possível aporte destes elementos de outras regiões do maciço, ou de outra fonte além da lixiviação do maciço.

Os resultados da qualidade do conteúdo aterrado em mg.L^{-1} , incluindo pH, DQO, íons e metais pesados, são apresentados em perfil (Figura 27) para a verificação da distribuição vertical das variáveis. Os valores limites (VL) foram marcados nos gráficos de Na, Mn, Al, Fe, Cd, Pb e Cr, que tiveram resultados superiores às concentrações limites para o resíduo ser classificado como inerte (Classe IIB), segundo o Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os resultados de Zn, Cu, Ag e Ba ficaram abaixo de VL e, por isso, os valores do Anexo G não aparecem nestes gráficos. Apenas com os resultados da solubilização das amostras sólidas já é possível afirmar que os resíduos aterrados não são inertes, portanto Classe IIA e, por consequência, o maciço do lixão Santa Madalena ainda é fonte primária de poluentes.

Os resultados de DQO nos resíduos aterrados variaram na faixa de 193 a 1.694 mg.L^{-1} , próximos aos valores obtidos por Gomes (1989) que variaram na faixa de 79 a 1.763 mg.L^{-1} . Esta coincidência nos resultados de DQO acontece por uma compensação entre frações orgânicas e inorgânicas ao longo do tempo. Em 1989, a maior parte da DQO deveria ser referente a frações orgânicas biodegradáveis e, em 2011, a maior parte deve ser referente a compostos orgânicos recalcitrantes e frações inorgânicas.

Figura 27 – Resultados das análises químicas do extrato de solubilização das amostras de solo e de resíduos aterrados no maciço do lixão desativado. Nota₁: com exceção do pH, todos os valores estão expressos na unidade mg.L⁻¹. Nota₂: --- nível do lençol de lixiviado suspenso após o término da escavação. Nota₃: a linha verde é o valor máximo do parâmetro para o resíduo ser considerado inerte, segundo o anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Nota₃: no fundo dos gráficos identificou-se o ano da deposição da camada, as camadas de solo de cobertura em marrom e em cinza são resíduos misturados a grandes quantidades de solo.

Sobre a distribuição espacial das variáveis, as principais observações são:

1. Os maiores valores de DQO e PO_4 na camada de 1994 corroboram com a hipótese de que a carga orgânica remanescente nestes resíduos aterrados pode ter sido consequência do menor tempo de exposição da camada a céu aberto;

2. Conforme verificado no Apêndice A, correlação muito forte foi encontrada nos pares Na/K, Sr/Ca, Cu/Zn (coeficientes de Pearson $p \geq 0,90$), forte nos pares Mn/Sr, Pb/Co, Pb/Cu, Pb/Zn, Pb/DQO, DQO/ PO_4 , PO_4 /Co ($0,70 \leq p \leq 0,89$) e forte negativa no par pH/Al ($p = -0,76$);

3. A média dos resultados acima do nível do lençol de lixiviado suspenso (3,5 m) é maior que a média dos resultados abaixo deste nível para PO_4 , DQO, Fe, Mn, Co, Sr, Ba, Ca, Na e K, mostrando sinais de maior mobilidade e lixiviação destes elementos na região do maciço abaixo dos níveis de lixiviado suspenso. O inverso ocorre para Cr e Mg. As demais variáveis (pH, Ni, Zn, Cu, Ag, Pb, Cd e Al) apresentaram médias bastante próximas ao longo de todo o perfil analisado.

Além do material sólido aterrado, o chorume imóvel foi outro componente do maciço que chamou atenção durante a escavação do poço cacimba. Não há conhecimento de outras pesquisas que analisaram este tipo de amostra. Como chorume imóvel, nomeou-se todo o líquido denso e escuro armazenado em pequenas poças aprisionadas por resíduos plásticos, fora dos caminhos preferenciais de transporte de lixiviado dentro do maciço do lixão Santa Madalena. O chorume imóvel permanece no estado líquido e estagnado dentro do maciço. É um tipo de amostra totalmente diferente do lixiviado e sua descoberta trouxe certa preocupação em relação à sua quantidade e qualidade (Figura 29).

Como estas amostras foram analisadas sem filtração, as elevadas concentrações de metais e componentes iônicos são provenientes das frações coloidais e suspensas do chorume imóvel, o que comprova que estes elementos devem estar, em sua grande maioria, adsorvidos, precipitados ou complexados, e neste caso, imobilizados dentro do conteúdo do maciço. Esta constatação levantou a hipótese de que o chorume imóvel contribui significativamente para a retenção (não mobilização) de elevadas concentrações de poluentes. Observando os resultados de qualidade do lixiviado e do extrato de solubilização das amostras sólidas, é notável que a mobilização de substâncias inorgânicas a partir do chorume imóvel é nula ou pouco significativa. Porque no caso destas elevadas concentrações de inorgânicos estarem prontas para ser mobilizadas, as amostras de lixiviado apresentariam

concentrações semelhantes às concentrações do chorume imóvel, o que não foi observado no lixiviado filtrado e nem no lixiviado não filtrado. Fato similar ocorreu com o conteúdo orgânico, a DQO e a DBO₅ no chorume imóvel é 50 e 30 vezes maior que no lixiviado, respectivamente. Portanto, a mobilização dos poluentes do maciço para o lixiviado acontece a partir de seu conteúdo sólido.

Figura 28 – Qualidade do chorume imóvel encontrado no maciço do lixão desativado. Nota₁: com exceção do pH (unidades de pH) e da condutividade elétrica CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), todos os valores estão expressos na unidade $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Nota₂: --- nível do lençol de lixiviado suspenso após o término da escavação. Nota₃: a linha vermelha é o valor máximo para lançamento de efluentes, segundo o Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Nota₃: no fundo dos gráficos identificou-se o ano da deposição da camada, as camadas de solo de cobertura em marrom e em cinza são resíduos misturados a grandes quantidades de solo.

(CONTINUA)

6. Resultados e Discussão

Figura 29 – Qualidade do chorume imóvel encontrado no maciço do lixão desativado. Nota₁: com exceção do pH (unidades de pH) e da condutividade elétrica CE ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$), todos os valores estão expressos na unidade $\text{mg}.\text{L}^{-1}$. Nota₂: --- nível do lençol de lixiviado suspenso após o término da escavação. Nota₃: a linha vermelha é o valor máximo para lançamento de efluentes, segundo o Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Nota₃: no fundo dos gráficos identificou-se o ano da deposição da camada, as camadas de solo de cobertura em marrom e em cinza são resíduos misturados a grandes quantidades de solo (FIM)

Para comparação e verificação do potencial poluidor, os valores permitidos para lançamento de efluentes (VL) em córrego Classe 2 do Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976) foram incluídos nos gráficos de pH, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, NAT, Ag, Zn, NO_2 e DBO_5 , variáveis que apresentaram resultados acima de VL. Apesar de não existir valor padrão para alcalinidade, DQO, NTK, Al, Ca, Mg, Na e K, as concentrações destas variáveis apresentaram-se bastante elevadas.

As concentrações de NO_3 apresentaram-se sempre abaixo do valor permitido para lançamento ($10 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$) e de SO_4 sempre abaixo do limite de detecção, coerente com o ambiente anaeróbio em que se encontra o maciço.

Ao comparar os resultados de NTK (464 a 2.613), DBO_5 (2.088 a 16.004) e DQO (5.260 a 47.800) no chorume imóvel com os resultados de NTK (380 a 1.016), DBO_5 (292 a 26.150) e DQO (6.972 a 35.250) no chorume avaliado por Schalch

(1984), observa-se que houve um aumento de NTK, que provavelmente se deve ao aumento de NAT. A DBO₅ e a DQO continuaram elevados, mostrando que no chorume imóvel ainda existe elevada carga orgânica e inorgânica não degradada.

Sobre a distribuição das variáveis em perfil, as principais observações são:

1. Os maiores valores de DBO₅, DQO e NTK foram encontrados na camada de 1994, o que apoia a hipótese do menor tempo de exposição da camada a céu aberto;

2. O pH manteve-se neutro a alcalino (entre 7,7 e 8,8) ao longo de todo o perfil, característica típica da fase metanogênica da decomposição segundo POHLAND; HARPER (1985). Ao considerar a cor escura, o pH das amostras sólidas e de chorume imóvel, bem como a alcalinidade e as concentrações de NAT no chorume imóvel, conclui-se que o material que compõe o maciço possui capacidade de tamponamento da água, i.e., resiste a mudanças de pH, neutralizando a acidez de qualquer fonte externa de água. Esta característica é decorrente de grandes quantidades de húmus (COTTA et al., 2007) e de bicarbonato de amônio (GARCÍA; CARDONA-GALLO, 2013), que controlam a acidez do meio;

3. Os baixos valores de condutividade elétrica corroboram com a hipótese de que os metais e os componentes iônicos estão representados nas frações suspensas e coloidais do chorume imóvel. Esta observação é coerente com os elevados resultados de pH e alcalinidade, parâmetros reconhecidamente responsáveis pela diminuição da mobilização de substâncias inorgânicas, conforme discussão em QASIM; CHIANG (1994);

4. Conforme pode ser verificado no Apêndice B, correlação muito forte foi encontrada nos pares pH/CE, pH/Na, pH/K, CE/Na, CE/K, COT/K, Zn/Pb, Fe/Co, Sr/Ca, Na/K ($p \geq 0,90$) e correlação forte nos pares pH/Alcalinidade, pH/COT, pH/NTK, pH/NAT, CE/DBO₅, CE/COT, CE/NTK, CE/NAT, DQO/DBO₅, COT/NAT, COT/NO₂, COT/Na, NTK/NAT, NTK/Na, NAT/NO₂, NAT/Na, NAT/K, NO₂/Na, NO₂/K, Zn/Cd, Zn/Ag, Zn/Sr, Zn/Ca, Pb/Cd, Pb/Sr, Pb/Ca, Cd/Cu, Cd/Ag, Cd/Sr, Cd/Ca, Ni/Cu, Fe/Al, Cu/Ag, Cr/Ba, Co/Al, Sr/Ba, Mn/Co, Mn/Al, Mn/Mg ($0,70 \leq p \leq 0,89$);

5. Os picos (maiores concentrações) foram observados nos gráficos de metais principalmente nas amostras coletadas sobre camadas de cobertura de solo ou sobre as amostras de resíduos que estavam misturados com grandes quantidades de solo. Isto pode ser explicado por duas hipóteses: (1^a) algum indício de que as camadas de solo adsorvem metais contribuindo para atenuação dos poluentes que seriam lixiviados do maciço e, (2^a) os solos usados para cobertura dos resíduos têm altos

6. Resultados e Discussão

teores de metais (ALMEIDA, 2009) que também contribuem para a composição do maciço e do lixiviado;

6. Com exceção dos resultados de NO_3 e ao contrário do material sólido, a média dos resultados de concentração abaixo do nível do lençol de lixiviado suspenso (3,5 m) é maior que a média dos resultados acima deste nível para todas as variáveis, mostrando indícios de baixa ou nenhuma mobilização de poluentes a partir do chorume imóvel;

7. As curvas de NTK e NAT são semelhantes em perfil, uma vez que NAT é parte contabilizada em NTK. O perfil apresentou média de 64% do NTK em forma de nitrogênio amoniacal e 36% de nitrogênio orgânico (N_{org} referente à proteína não hidrolisada e microrganismos). Este resultado era esperado, pois segundo KDJELSEN et al. (2002), em qualquer depósito de resíduos há grandes quantidades de nitrogênio amoniacal em seu lixiviado. A média dos resultados de NAT abaixo do nível do lençol de lixiviado suspenso (3,5 m) é 30% maior que a média dos resultados acima deste nível. Detalhes dessas frações de NAT e de N_{org} estão na Tabela 25;

8. Razões de DBO/DQO $\geq 0,50$ indicam que o lixiviado possui matéria orgânica (MO) prontamente biodegradável. As relações de DBO/DQO do chorume imóvel estão na Tabela 25. Observa-se que algumas camadas apresentaram valores $\geq 0,50$, logo o maciço ainda contém significativa carga orgânica remanescente.

Tabela 25 – Frações do NTK (divididas em nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal) e razão DBO/DQO do chorume imóvel aterrado no maciço do lixão desativado

Ano	Amostra	Prof m	N_{org} %	NAT %	DBO/DQO
1995	1	0,9	0,34	0,66	0,5
	3	1,3	0,68	0,32	0,1
	4	1,8	0,57	0,43	0,1
	5	2,1	0,59	0,41	-
	7	2,5	0,19	0,81	0,8
1994	8	2,7	0,25	0,75	0,3
	9	3,3	0,59	0,41	0,5
	10	3,8	0,41	0,59	0,3
1991	11	4,3	0,26	0,74	0,4
	12	4,6	0,17	0,83	0,4
	13	5,4	0,24	0,76	0,3
1988	14	5,8	0,13	0,87	0,2
1985	15	6,4	0,14	0,86	0,5
	16	6,9	0,26	0,74	0,2

Nota: NTK = nitrogênio total Kjeldahl, Prof = profundidade coletada, N_{org} = nitrogênio orgânico, NAT = nitrogênio amoniacal total, DBO5 = demanda bioquímica de oxigênio, DQO = demanda química de oxigênio

De acordo com Kjeldsen et al. (2002), quando as células de resíduos são depositadas em séries horizontais, é comum encontrar diferentes composições em diferentes partes do maciço e, às vezes, diferentes fases de decomposição. Após

caracterizar o conteúdo aterrado no maciço do lixão Santa Madalena, variações na composição do perfil foram observadas, as quais podem ser atribuídas à diversidade de resíduos depositados (incluindo resíduos industriais) e aos diferentes procedimentos de operação do lixão. Apesar desta variação na qualidade, a idade do lixão, o pH e a temperatura de todas as amostras são indícios bastante forte de que o perfil está integralmente na fase metanogênica.

Os resultados da solubilização das amostras sólidas aterradas e os resultados das elevadas concentrações de poluentes no chorume imóvel demonstram que o conteúdo aterrado no lixão Santa Madalena não pode ser considerado inerte. Portanto, apesar de passados 18 anos desde seu encerramento, este maciço de resíduos ainda é uma fonte potencial de substâncias perigosas aos ecossistemas da região e à saúde pública.

6.2. CARACTERÍSTICAS DO LENÇOL DE LIXIVIADO SUSPENSO

A cor escura do chorume imóvel não é transferida para o lixiviado e o mesmo ocorre para a concentração dos poluentes. O odor das amostras de lixiviado suspenso é parecido com o odor das amostras de chorume imóvel e das amostras sólidas. As concentrações de DBO₅, NAT, NO₂, Pb, Cd, Fe, Mn e Cr apresentaram-se acima do valor limite para lançamento de efluentes, segundo o Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Esta constatação confirma que o lixiviado do lixão Santa Madalena não poderia ser lançado para o meio antes de tratamento prévio, mesmo 18 anos após o encerramento. A comparação da Tabela 26 mostrou que o lixiviado do lençol suspenso é semelhante à qualidade do lixiviado na fase metanogênica descrita por Ehrig (1989) e Souto e Povinelli (2011), comprovando que o lixão Santa Madalena está na fase metanogênica. De maneira geral, as concentrações detectadas nas amostras PC são semelhantes às concentrações das amostras de lixiviado coletadas no primeiro lisímetro, com exceção de NAT, Fe, NO₃, Ca, Ba, Cd e DBO₅ que são maiores no lisímetro do que no lençol suspenso e o contrário acontece para NO₂, PO₄, K e Al.

6. Resultados e Discussão

Tabela 26 – Qualidade do lençol de lixiviado suspenso do lixão desativado

Variáveis	LS1*	LS2*	PC1**	PC2**	FM1	FM2	VL
Prof (m)	1,0	2,1	1,0	1,0			
pH	7,7	8,1	6,7	7,0	7,5 – 9,0	5,9 – 9,2	5 – 9
Alcalinidade	2154	2252	-	-	300 – 11500	125 – 20200	-
CE	4,77	5,12	1040	3770	-	100 – 45000	-
DBO ₅	1333	399	nd	-	20 – 550	3 – 17200	5,0
DQO	1432	756	140	445	500 – 4500	20 – 35000	-
COD	86	961	-	-	-	-	-
PO ₄	3,4	3,1	0,6	4,0	-	-	-
NTK	330	317	16	43	50 – 5000	-	-
NAT	153	171	18	45	30 – 3000	-	0,5
NO ₂	5,0	5,0	0,3	nd	0 – 25	-	1,0
NO ₃	0,01	0,01	0,43	6,55	0,1 – 50,0	-	10,0
Ca	294	300	72	129	20 – 600	-	-
Sr	0,3	0,3	0,2	0,5	0,3 – 7,0	-	-
K	213	235	17	193	10 – 2500	-	-
Ni	0,25	0,37	0,05	0,10	0,02 – 2,05	1,4	2,0
Mg	39	39	8	20	40 – 350	-	-
Co	0,09	0,10	0,03	0,06	0,004 – 0,95	-	-
Cl ⁻	-	-	-	161	100 – 5000	20 – 6900	-
Ba	nd	nd	nd	0,53	-	-	1,0
Al	8,2	5,9	0,7	0,5	-	-	-
Na	258	320	12	182	50 – 4000	-	-
Zn	1,38	0,57	nd	0,02	0,03 – 4,00	35	5,0
Pb	0,33	0,52	0,05	0,05	0,008 – 1,020	6,7	0,1
Cd	0,06	0,09	0,01	0,01	0,005 – 0,140	0,6	0,01
Fe	29	30	30	44	3 – 280	0,01 – 720	15,0
Mn	0,37	0,46	1,54	1,48	0,03 – 45	30	1,0
Cu	0,093	0,143	0,008	0,016	0,004 – 1,400	2,9	1,0
Cr	0,20	0,24	0,01	0,04	0,03 – 1,60	1,0	0,05
Ag	0,008	0,008	0,003	0,001	-	-	0,02

Nota₁: com exceção do pH (unidades de pH) e da condutividade elétrica CE ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$), todos os valores estão expressos na unidade $\text{mg}.\text{L}^{-1}$. Nota₂: em vermelho estão os valores acima do valor limite VL, permitido para lançamento de efluentes, segundo o Decreto Estadual nº 8.468 (São Paulo, 1976). Nota₄: nd = valor abaixo do limite de detecção, Prof = profundidade coletada, LS = lixiviado suspenso coletado em julho/2011 (sem chuvas), PC1 e PC2 = lixiviado suspenso coletado em março/2013 e maio/2013, respectivamente (com chuvas); FM1 e FM2 = valores típicos do lixiviado na fase metanogênica segundo Ehrig (1989) e Souto e Povinelli (2011), respectivamente; NTK = nitrogênio total Kjeldahl, NAT = nitrogênio amoniacal total, DBO₅ = demanda bioquímica de oxigênio, DQO = demanda química de oxigênio, COD = carbono orgânico dissolvido.

Como as amostras de lixiviado suspenso foram coletadas da superfície livre do poço cacimba, observou-se que os resultados de DBO₅, DQO, NTK, NAT, NO₂, NO₃ sofreram influência do período de exposição a céu aberto. Para DBO₅ e DQO, os menores valores foram verificados nas amostras PC, que estavam há 60 e 42 dias em exposição antes da coleta. A amostra LS2 ficou 24 horas a mais exposta antes de ser coletada em comparação com a amostra LS1, tempo suficiente para acarretar diferenças nos resultados. Já na série nitrogenada, a exposição diminuiu as concentrações de nitrogênio amoniacal e aumentou as concentrações de nitrito e nitrato (oxidação da amônia). Contudo, os menores valores nas amostras PC também são consequência da diluição do lixiviado pela chuva. Mesmo assim, é possível afirmar que a exposição a céu aberto acelera a degradação das frações orgânicas e a oxidação do nitrogênio amoniacal no lixiviado do lixão Santa Madalena.

A qualidade das amostras de lixiviado suspenso foi semelhante entre as diferentes amostras apenas em relação a pH, alcalinidade, Sr e Fe. As demais variáveis variavam principalmente entre as amostras LS (lixiviado suspenso coletado durante a escavação do poço cacimba sem ocorrência de chuvas - julho/2011) e PC (lixiviado suspenso coletado durante o monitoramento dos lisímetros com ocorrência de chuvas - março e maio/2013). Esta constatação comprova que houve influência das chuvas na qualidade do lixiviado suspenso. Os resultados de DBO₅, DQO, PO₄, NTK, NAT, NO₂, Ca, K, Ni, Mg, Co, Al, Na, Zn, Pb, Cd, Cu, Cr e Ag foram menores nas amostras PC, mostrando o efeito de diluição. Já os resultados de NO₃ (fezes de animais e fertilizantes), CE (a chuva possui pH ácido que faz mobilizar maior quantidade de componentes iônicos, logo aumenta a condutividade elétrica do lixiviado), Ba (oriundo de efluentes domésticos, produtos de limpeza) e Mn (possivelmente da lixiviação do terreno) foram maiores nas amostras PC, parâmetros diretamente relacionados a drenagem pluvial da fazenda. Também houve diferença entre as amostras PC1 (precipitação média de 97,6 mm, na semana anterior a coleta) e PC2 (precipitação média de 0,2 mm, na semana anterior a coleta), com exceção de NO₂, Ba, Al, Mn e Ag, as demais variáveis em PC1 foram menores que em PC2, reforçando a hipótese de diluição do lixiviado pela chuva.

Entre os constituintes orgânicos mensurados em COD, os compostos orgânicos xenobióticos (XOC) são os mais preocupantes, mesmo representando um pequeno percentual (SCHUELER, 2005). O comportamento destes compostos é complexo, pouco conhecido e não existem informações disponíveis sobre a degradabilidade em ambientes fortemente redutores (ALVES, 2012). Devido à falta de informações e às baixas concentrações, alguns dos XOC são chamados de contaminantes emergentes e estão associados a significativos riscos causados por depósitos de resíduos. Tais substâncias têm causado considerável preocupação, pois além de sua ocorrência extensiva, potencial de toxicidade para o meio aquático e riscos à saúde humana, ainda não existe legislação pertinente que dite os limites de concentração máximos desses compostos nos diferentes ambientes aquáticos. Embora sejam encontrados em baixas concentrações ($\mu\text{g.L}^{-1}$ a ng.L^{-1}), seus efeitos ao organismo humano não podem ser ignorados, uma vez que algumas dessas substâncias apresentam características cumulativas nos tecidos humanos, resultando em efeitos crônicos nocivos à saúde (LIN et al., 2010). Os resultados da análise de contaminantes emergentes da amostra de lixiviado suspenso coletado da superfície livre do poço

6. Resultados e Discussão

cacimba (dentro do maciço de resíduos) estão apresentados na Tabela 27. Observa-se que todos os elementos analisados foram detectados, comprovando a presença de inúmeras substâncias de naturezas diversas na composição do lixiviado e das águas impactadas por ele.

Tabela 27 – Qualidade do lençol de lixiviado suspenso do lixão desativado

Componente	Onde é encontrado	Concentração média (ng.L ⁻¹)
Diclofenaco	Analgésicos e anti-inflamatórios	20 (máximo 303 ng.L ⁻¹)
Ibuprofeno	Analgésicos e anti-inflamatórios	36
Naproxeno	Analgésicos e anti-inflamatórios	48
Paracetamol	Analgésicos e anti-inflamatórios	37
Fenazona	Analgésicos e anti-inflamatórios	20
Caféina	Estimulantes	43 (máximo 141 ng.L ⁻¹)
Paraxantina	Estimulantes	32
Teobromina	Estimulantes	51
Teofilina	Estimulantes	34
1-Metilxantina	Estimulantes	210
3-Metilxantina	Estimulantes	280
Atenolol	Agentes anti-hipertensivos	35
Metoprolol	Agentes anti-hipertensivos	41
Sotalol	Agentes anti-hipertensivos	48
Iohexol	Meio de contraste	210
Iomeprol	Meio de contraste	180
Iopamidol	Meio de contraste	190
Iopromide	Meio de contraste	180
Claritromicina	Antibióticos	75
Eritromicina	Antibióticos	43
Roxitromicina	Antibióticos	95
Sulfametoxazol	Antibióticos	26
Trimetoprim	Antibióticos	25
Bezafibrato	Reguladores lipídicos	35
Ácido clofíbrico	Reguladores lipídicos	34 (máximo 39ng.L ⁻¹)
Gemfibrozil	Reguladores lipídicos	20
Cetirizina	Anti-histamínicos	22
Loratadina	Anti-histamínicos	27
Carbamazepina	Anticonvulsivos e sedativos	22 (máximo 220ng.L ⁻¹)
Diazepam	Anticonvulsivos e sedativos	14 (máximo 42ng.L ⁻¹)
Primidona	Anticonvulsivos e sedativos	27
Tetrazepam	Anticonvulsivo e sedativos	25
Citalopram	Antidepressivos	32
Fluoxetina	Antidepressivos	160
Sertralina	Antidepressivos	160
Atrazina	Pesticidas	14
Desetilatrazina	Pesticidas	17
Desisopropilatrazina	Pesticidas	56
Diuron	Pesticidas	33
Isoproturão	Pesticidas	30
Mecoprope	Pesticidas	12
Metazaclo	Pesticidas	18
1H-Benzotriazol	Inibidores de corrosão / tintas	47 (máximo 303ng.L ⁻¹)
Toliltriazol	Inibidores de corrosão / tintas	49
Benzoilecgonina	Metabólito da cocaína	23
Pantoprazol	Inibidor de bomba de prótons	48
Haloperidol	Antidepressivos	40
Tamoxifeno	Tratamento de câncer	60
Cotina	Tabaco	40
Terbutilazina	Pesticidas	30
Ácido acetilsalicílico	Anti-inflamatórios	40
Benzenosulfonamida	Antibióticos	30
Benzenosulfonamida	Antibióticos	30
4-hidroxiclofenaco	Anti-inflamatórios	30

Como principais observações sobre esta análise, verificou-se que o lixiviado suspenso possui elevada concentração de 1H-Benzotriazol (de inibidores de corrosão), que é típico de efluentes de depósitos de resíduos, devido ao despejo de tintas, solventes e outros materiais de construção civil. Uma quantidade considerável de diclofenaco (330 ng.L^{-1}) foi encontrada no lixiviado, substância persistente no meio por ser de difícil quebra, ainda mais sob as condições redutoras do lixão. A concentração de cafeína está razoavelmente alta (141 ng.L^{-1}) para o lixiviado de um antigo depósito de resíduos. Segundo Ide et al. (2013), a cafeína tem tempo de meia vida curto, com um período aproximado de 0,8 dia. Os autores detectaram cafeína em águas superficiais e concluíram que esta substância pode ser usada como traçador de atividade antrópica (sua detecção confirma o lançamento de efluentes domésticos no meio). Logo, a presença da cafeína no lixiviado suspenso é um forte indício que existe infiltração da drenagem de áreas adjacentes ao lixão (com sistemas de despejo de efluentes domésticos) no maciço de resíduos do lixão. E por último, a universidade alemã chamou atenção para a detecção de concentrações relevantes de diazepam (42 ng.L^{-1}) e carbamazepina (220 ng.L^{-1}), uma vez que na Europa existem restrições e controle para o uso destas substâncias (EMCDDA, 2014).

6.3. QUALIDADE DO LIXIVIADO EM CAMADAS DE DIFERENTES IDADES

Os lisímetros funcionaram perfeitamente durante todas as campanhas de amostragem, extraindo lixiviado de todas as seis camadas. As amostras L1 e N1; L2 e N2; L3 e N3; L4 e N4; L5 e N5; e L6 e N6 foram coletadas das profundidades 0,8; 1,3; 1,8; 2,3; 2,8; e 3,3 m, respectivamente. A quantidade e a qualidade do lixiviado amostrado variavam entre as camadas. As menores quantidades de amostras foram coletadas nos lisímetros 1 e 4. Ressalta-se que os volumes das amostras coletadas nos lisímetros instalados no maciço do lixão neste experimento foram maiores do que os coletados nos lisímetros instalados no solo dos experimentos de Varnier (2007) e Bertolo (2001). Isto possibilitou a realização das análises com amostras de lixiviado não diluídas ou pouco diluídas (na maioria dos casos), reduzindo os erros nos resultados.

As amostras de lixiviado eram translúcidas e escureciam (mudavam de alaranjado para amarronzado) nas maiores profundidades. No entanto, esta cor forte

6. Resultados e Discussão

era amenizada nas amostras de lixiviado que eram filtradas (Figura 29). O odor do lixiviado era semelhante ao das amostras de chorume imóvel e das amostras sólidas (semelhante a óleo diesel). A cor marrom é característica da fase metanogênica, a qual pode ser atribuída em grande parte aos ácidos húmicos e fúlvicos, enquanto o forte odor pode ser causado pelo nitrogênio amoniacal (ABLP, 2006).

Figura 29 – Detalhe da coloração das amostras não filtradas (N) e filtradas (L) do lixiviado coletado nos lisímetros de sucção em 21/02/2013

O tempo da filtração e a quantidade de filtros usados (Figura 30) variavam bastante de uma amostra para a outra. A filtração da amostra L2 sempre era a mais demorada. Ao observar as características do material removido nesta profundidade, percebeu-se que a grande quantidade de resíduos de oficina mecânica, contendo óleos e graxas, com certeza contribuiu para a colmatação dos filtros, tornando a filtração mais lenta.

Figura 30 – Quantidade de filtros de acetato de celulose (0,45 µm) usados para filtração de 200 ml de lixiviado do maciço do lixão desativado de São Carlos: 1 filtro para L1 referente a profundidade 0,8 m; 5 filtros para L2 referente a profundidade 1,3 m; 1 filtro para L3 referente a profundidade 1,8 m; 2 filtros para L4 referente a profundidade 2,3 m; 2 filtros para L5 referente a profundidade 2,8 m; 3 filtros para L6 referente a profundidade 3,3 m

Diferentemente da temperatura das amostras do conteúdo do maciço, a temperatura das amostras de lixiviado variou em profundidade e aumentaram ou diminuíram conforme a temperatura ambiente (Tabela 28). Isto acontece porque as porções de resíduos mais próximas da parede do poço cacimba ficam sob as mesmas condições atmosféricas. Portanto, apesar dos cuidados quanto aos critérios de instalação e de monitoramento da estação experimental, que são para garantir a mínima perturbação e alteração do meio, observa-se que a qualidade das amostras sofre interferência da presença do experimento dentro do maciço e dos procedimentos de amostragem. Ressalta-se que a temperatura ótima para as arqueas metanogênicas está acima de 30°C (EHRIG, 1983). Porém, temperaturas inferiores não prejudicam estes microrganismos, desde que a massa de resíduo não apresente temperaturas abaixo de 15°C (HAM, 1979 apud EHRIG, 1983).

Tabela 28 – Temperatura ambiente e das amostras de lixiviado do lixão desativado de São Carlos

Temperatura	dez/12	jan/13	mar/13	mai/13	jul/13	set/13	jan/14
Ambiente	28	26	26	21	17	23	30
L1	27	26	25	23	21	25	30
L2	27	26	25	24	21	24	28
L3	26	26	25	24	23	23	27
L4	25	25	25	23	22	23	27
L5	25	25	25	23	22	22	26
L6	25	25	25	22	20	22	26

As variáveis Al, Ba, Cu, Fe, Cd, Pb, Zn, PO₄ e SiO₂ tiveram diferenças significativas entre as amostras brutas e as amostras filtradas de lixiviado (coeficientes de variação > 30%). Esta observação indica que estes elementos são bastante representativos nas frações suspensa e coloidal do lixiviado, as quais ficaram retidas nos filtros de 0,45 µm. As variáveis DQO, DBO₅, pH, CE, alcalinidade, NTK, NAT, NO₂, NO₃, Ni, Co, Cl⁻, F⁻, Mn, Cr, Ag, Mg, Ca, Na, K e Sr não tiveram diferenças significativas entre amostras filtradas e não-filtradas (coeficientes de variação < 30%).

A qualidade da areia lavada usada como base e preenchimento do espaço entre o maciço e os lisímetros de sucção é apresentada na

Tabela 29. Apesar de ser uma norma para classificação de resíduos, a qualidade do extrato de solubilização da areia foi comparada aos valores limites do Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004). A areia pode ser considerada inerte, possuindo baixa condutividade elétrica, baixa mobilização de sílica e baixíssima concentração de substâncias orgânicas (COD e DQO). Os resultados demonstram que a areia usada como suporte não alterou nenhuma das variáveis avaliadas no lixiviado.

6. Resultados e Discussão

Tabela 29 – Resultados da solubilização da areia usada na instalação dos lisímetros

Variáveis	Areia suporte	Anexo G
pH	6,5	-
Alcalinidade	45	-
CE	6	-
DQO	18	-
COD	5	-
SiO ₂	1	-
NTK	7	-
NAT	1	-
NO ₂	0,01	-
NO ₃	0,1	10,0
Ca	13	-
Sr	0,02	-
K	0,5	-
Ni	0,02	-
Mg	0,9	-
Co	nd	-
Cl ⁻	20	250
Ba	0,7	0,7
Al	0,1	0,2
Na	1	200
Zn	0,3	5,0
Pb	0,27	-
Cd	0,07	-
Fe	0,3	0,3
Mn	nd	0,1
Cu	nd	2,0
Cr	nd	0,05
Ag	nd	0,05

Nota₁: nd = valor abaixo do limite de detecção, unidades em mg.L⁻¹, com exceção de pH em unidades de pH e de condutividade elétrica CE em $\mu\text{S.cm}^{-1}$. Nota₂: Anexo G é o valor máximo do parâmetro para o resíduo ser considerado inerte, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Como o interesse desta pesquisa é avaliar a mobilização dos poluentes, apenas as frações dissolvidas (das amostras filtradas) são apresentadas (Figuras 32 e 33). Após o cálculo do balanço iônico, constatou-se que todos os resultados analíticos apresentaram erros menores que 20% em todas as amostras e em todas as campanhas de amostragem. Neste caso, todos os resultados foram considerados satisfatórios para a execução das interpretações da mobilização de poluentes do maciço para o lixiviado. Do total de 42 amostras analisadas, 26 (62%) apresentaram erro menor que 10%. As amostras de lixiviado das três primeiras camadas de resíduos (L1, L2 e L3) foram as que apresentaram a maioria (56%) dos erros acima de 10%. Sobre as campanhas de amostragem, janeiro/2013, maio/2013 e setembro/2013 apresentaram os maiores erros (entre 10 e 20%). Como a maior parte dos resultados apresentou erro do balanço iônico abaixo ou próximos a 10%, a reprodutibilidade das análises foi confirmada. Através de diagramas de Stiff é possível nota graficamente uma alteração da composição hidroquímica do lixiviado nas diferentes camadas de resíduos (Figura 31).

Figura 31 – Composição hidroquímica do lixiviado do lixão Santa Madalena em diagramas de Stiff (CONTINUA)

6. Resultados e Discussão

Figura 32 – Composição hidroquímica do lixiviado do lixão Santa Madalena em diagramas de Stiff (FIM)

Observa-se que não há variação relevante em relação aos meses secos e chuvosos. Nas camadas mais antigas de resíduos e mais profundas, as amostras de lixiviado são alteradas para bicarbonatadas sódico-potássicas. Ressalta-se que há uma brusca redução de Ca do L2 para L3, que possivelmente indica troca catiônica. Em geral, nos diagramas que não consideram o NAT, a proporção de ânions é maior que a proporção dos cátions. Percebeu-se então, que esta proporção foi equilibrada nos diagramas que consideraram o cátion amônio.

Figura 32 – Qualidade do lixiviado no maciço do lixão desativado em perspectiva temporal e espacial em profundidade. Nota₁: com exceção do pH (unidades de pH), Eh (mV) e da condutividade elétrica CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), todos os valores estão expressos na unidade $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Nota₂: a linha vermelha é o valor limite (VL) permitido para lançamento de efluentes, segundo o Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Nota₃: no fundo dos gráficos identificou-se o ano da deposição da camada, as camadas de solo de cobertura em marrom e em cinza são resíduos misturados a grandes quantidades de solo (CONTINUA)

6. Resultados e Discussão

Em algumas campanhas de amostragem, algumas variáveis não puderam ser analisadas devido ao pequeno volume de amostra ou apresentaram valores próximos ou iguais ao limite de detecção e por isso, estas curvas mensais não aparecem nos gráficos. Todos os resultados das variáveis físico-químicas estão apresentados no Apêndice E.

Os gráficos mostram que a qualidade do lixiviado é influenciada pela qualidade da camada em que foi coletado, mudando verticalmente para a maioria das variáveis. O formato da curva é semelhante ao formato da curva nas amostras sólidas para a maioria das variáveis. Por outro lado, observa-se que apesar de existirem variações em relação ao tempo, não há padrões específicos para meses secos ou chuvosos. As variáveis CE, alcalinidade, DQO, DBO₅, NTK, NAT, NO₃, COD, Na, PO₄, Zn, Mn, Mg, Co, K, pH, Eh, Cl⁻, Ni, Fe, Al, Ca e Sr tiveram comportamento similar ao longo do tempo, demonstrado pelo formato semelhante entre as curvas mensais. Não houve padrão para Ba, Ag, Cr, Cu, Cd, Pb, F⁻, SiO₂ e N_{org}, NO₂.

Conforme pode ser visto no Apêndice C, os pares CE/NTK, CE/NAT, CE/COD, CE/Na, CE/K, alcalinidade/NTK, alcalinidade/NAT, alcalinidade/COD, DQO/NAT, DQO/COD, DQO/Cl⁻, NTK/NAT, NTK/COD, NTK/Cl⁻, NTK/Na, NTK/K, NAT/COD, NAT/Cl⁻, NAT/Na, COD/Cl⁻, COD/Na, COD/K, Cl⁻/Na, Cl⁻/K, Fe/Ca, Na/K apresentaram correlação muito forte ($p \geq 0,90$) e os pares pH/CE, pH/NTK, pH/NAT, pH/COD, pH/Na, pH/K, CE/alcalinidade, CE/DQO, CE/DBO₅, CE/Cl⁻, CE/Co, alcalinidade/DQO, alcalinidade/DBO₅, alcalinidade/Cl⁻, alcalinidade/Na, alcalinidade/K, DQO/DBO₅, DQO/NTK, DBO₅/PO₄, DQO/NO₃, DQO/Co, DQO/Na, DQO/K, DBO₅/NTK, DBO₅/NAT, DBO₅/COD, DBO₅/Cl⁻, DBO₅/Co, DBO₅/Na, DBO₅/K, NTK/Co, NAT/K, NAT/Co, COD/NO₃, COD/Co, Cl⁻/NO₃, Cl⁻/Co, NO₃/Na, NO₃/Zn, Zn/Al, Cr/Ni, Fe/Mn, Fe/Sr, Mn/Ca, Mn/Sr, Co/Na, Co/K e Sr/Ca apresentaram forte correlação ($0,70 \leq p \leq 0,89$). Os pares pH/Mn, CE/Mn, NTK/Mn, NTK/Sr, NAT/Sr, NAT/Mn, COD/Mn apresentaram correlação forte negativa ($-0,89 \leq p \leq -0,70$).

A fase metanogênica é o período de atividade biológica mais intensa dos depósitos de resíduos (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995), provando que os aterros são reatores anaeróbios. Todos os grupos microbianos estão atuando no processamento dos resíduos. Portanto, espera-se que a matéria orgânica seja convertida, produzindo-se um lixiviado composto quase que exclusivamente de materiais recalcitrantes e outros restos do processo de decomposição, como a amônia (SOUTO, 2009).

1) Discussão sobre os resultados de pH

O lixiviado do lixão Santa Madalena pode ser caracterizado como neutro a levemente alcalino, com faixa de pH entre 7 e 8. Esta característica é comum para um depósito de resíduos na fase metanogênica. A faixa de pH ótima para as arqueas metanogênicas está entre 6,7 e 7,5, mas uma faixa mais ampla – 5,0 a 9,0 – não inibe suas atividades (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

Um lisímetro experimental de Farquhar e Rovers (1973) que simulava o maciço de resíduos de um aterro recebeu infiltração de água por longo período de tempo. Verificou-se que o pH do maciço manteve-se em torno de 6,0 e, por consequência, a metanogênese foi inibida. Os autores levantaram a hipótese de que isto tenha acontecido devido ao oxigênio dissolvido da chuva. No entanto, no maciço do lixão Santa Madalena, apenas um resultado de baixo pH (6,4) foi detectado (em janeiro de 2013) na amostra mais próxima à superfície. Assim, baixos valores de pH no maciço do lixão Santa Madalena não foram observados, mesmo nas estações chuvosas quando o maciço recebe bastante infiltração das águas da chuva.

2) Discussão sobre os resultados de alcalinidade

Com exceção de duas amostras (206 e 473 mg.L⁻¹) do lisímetro mais próximo à superfície, os demais resultados de alcalinidade no lixiviado foram maiores ou iguais a 500 mg.L⁻¹ CaCO₃. Estes resultados elevados indicam que o maciço de resíduos possui capacidade de tamponamento (MORAES, 2004), i.e., resiste a mudanças de pH, neutralizando a acidez das chuvas e de qualquer outra fonte externa de água. Esta característica é responsável por não baixar o pH do maciço mesmo nas estações chuvosas, contrariando a hipótese do experimento de Farquhar e Rovers (1973). A característica de tamponamento foi comprovada durante a medição de alcalinidade, uma vez que durante a realização da análise o pH deve ser reduzido com adição de ácido nas amostras. Essa redução de pH nas amostras do lixiviado do lixão Santa Madalena foi bastante demorada, a queda do pH era observada durante a adição do ácido, mas durante a homogeneização o pH voltava a subir. A capacidade de tamponamento do lixiviado e do maciço de resíduos pode ser atribuída às elevadas quantidades de húmus (COTTA et al., 2007) e de bicarbonato de amônio (NH₄HCO₃) (CHEN, 1996), substâncias conhecidas por controlar a acidez do meio.

A disposição de resíduos de construção e demolição, que contêm gesso, cimento e cal, pode fazer com que a alcalinidade do lixiviado aumente (FERREIRA et al., 2007 apud SOUTO, 2009). Em geral, o lixiviado de depósitos de resíduos na fase metanogênica possui elevada alcalinidade, devido aos processos de dissolução e decomposição que ocorrem no maciço, liberando grandes concentrações de carbonatos e bicarbonatos (CHRISTENSEN; KJELDSEN, 1989 apud SOUTO, 2009). Estes íons são fundamentais na formação de complexos e precipitados com Ca, Mg, Fe e Mn e alguns metais pesados (CHRISTENSEN et al., 2001). Observa-se na Figura 33 que, para a maioria dos resultados de pH encontrada no maciço, a alcalinidade total é referente à concentração quase exclusiva de íons bicarbonatos (HCO_3^-).

Figura 33 – Sistema $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$: Especiação relativa (%) de ácido carbônico H_2CO_3 , bicarbonato HCO_3^- e carbonato CO_3^{2-} na água (Fonte: PEDERSEN et al., 2013)

3) Discussão sobre os resultados de Eh

Os resultados de potencial redox (Eh) foram sempre negativos em todas as camadas de resíduos, o que comprova que o maciço de resíduos do lixão Santa Madalena é um ambiente com condições redutoras, coerente para a fase metanogênica em que se encontra. Entretanto, o potencial redox pode aumentar em casos de elevada infiltração de água de chuva (FARQUHAR; ROVERS, 1973), que tem elevado potencial redox por conter bastante oxigênio (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995). No caso do Eh, a hipótese de Farquhar e Rovers (1973) foi verificada como verdadeira para o caso do maciço do lixão Santa Madalena. Os valores de Eh na primeira camada aumentaram nos meses chuvosos. Porém, à medida que havia infiltração de água da chuva, o oxigênio era consumido até atingir os mesmos valores típicos de Eh das respectivas camadas de resíduo. A flutuação significativa (até 250 mV) aconteceu apenas na camada mais próxima da superfície.

4) Discussão sobre os resultados de CE e componentes iônicos

A condutividade elétrica CE do lixiviado variou entre 1.037 a 8.376 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$. Logo, não é tão baixa quanto se esperava, sendo este o principal parâmetro que pode comprovar a ocorrência da mobilização de poluentes (metais) do maciço para o lixiviado. Como as concentrações dos íons amônio (NH_4^+), sódio (Na^+), potássio (K^+), cloreto (Cl^-) e bicarbonato (HCO_3^-) foram elevadas, estes devem ser os maiores contribuintes para a condutividade elétrica CE do lixiviado, o que explica a forte correlação ($p \geq 0,9$) entre a CE e estes íons.

5) Discussão sobre os resultados de COD

O carbono orgânico dissolvido (COD) nas áreas dos depósitos de resíduos é proveniente da solubilização da matéria orgânica (CHRISTENSEN et al., 1996). Mesmo em depósitos de resíduos antigos com intensa metanogênese, o lixiviado pode conter por muitas décadas concentrações de COD em nível de milhares de miligramas por litro (EHRIG, 1983). No lixiviado do lixão Santa Madalena os resultados de COD apresentaram-se na faixa de 82 a 1.082 $\text{mg}.\text{L}^{-1}$. O COD pode, por si só, ser um poluente expressivo das águas subterrâneas, mas também pode influenciar o comportamento de muitos outros poluentes devido à participação nos processos redox (BJERG et al., 1995), à capacidade de formar complexos com metais pesados (CHRISTENSEN et al., 1996 apud SANPHOTI et al., 2006) e à capacidade de ligação hidrofóbica que formam contaminantes orgânicos xenobióticos (CHIOU et al., 1986).

De forma simplificada, COD é uma medida direta da matéria orgânica carbonácea solubilizada, o qual mensura metano, substâncias não-húmicas e substâncias húmicas. Harmsen (1983) mostrou que 33% do conteúdo de COD no lixiviado da fase metanogênica era composto por substâncias com alto peso molecular (peso molecular > 1000 Da) e baixa degradabilidade. Para o lixiviado de um lixão na fase metanogênica, a maior parte do COD deve ser composta por metano e substâncias húmicas (ARTIOLA-FORTUNY; FULLER; 1982 apud CHRISTENSEN et al., 1998). Como as substâncias húmicas controlam a acidez do meio (COTTA et al., 2007), elas também estão diretamente relacionadas à alcalinidade, o que foi confirmado através da correlação muito forte entre alcalinidade e COD ($p \geq 0,90$).

6. Resultados e Discussão

A participação da matéria orgânica, biodegradável ou não, na DQO pode ser avaliada fazendo-se uma análise de COD e DQO dissolvida (Figura 34). Uma constatação importante feita a partir desta relação é que valores elevados de DQO, que é muito comum em lixiviados, não representa bons resultados para se fazer estimativa da concentração de matéria orgânica nas amostras.

Figura 34 – Relação entre os resultados de carbono orgânico dissolvido e demanda química de oxigênio dissolvida

6) Discussão sobre os resultados de DBO₅ e DQO

As variáveis DBO₅ (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio) indicam o consumo de oxigênio necessário para estabilizar a matéria orgânica contida na amostra. São medidas indiretas para aferir a quantidade de matéria orgânica carbonácea. Na DBO₅, apenas a matéria orgânica biodegradável é oxidada por microrganismos presentes na amostra preparada, enquanto na DQO, matéria orgânica biodegradável, parte da matéria orgânica recalcitrante e matéria inorgânica são oxidadas por reagentes químicos fortes adicionados às amostras. Ressalta-se que, ao contrário da determinação de DQO, a determinação de DBO₅ em amostras de lixiviados da fase metanogênica não é simples. Para as amostras do lixiviado do lixão Santa Madalena, muitas diluições foram testadas em todas as campanhas de amostragem. A faixa de diluições para o ensaio de DBO₅ é determinada com base nos resultados de DQO. Entretanto, altas concentrações de DQO no lixiviado indicavam o uso de diluições elevadas. Como consequência, os resultados de DBO₅ ficavam abaixo do limite de detecção. O ensaio então era realizado com pelo menos 6 diluições diferentes para cada amostra, incluindo menores diluições ou até mesmo nenhuma diluição (no caso de ter volume de amostra suficiente). Este fato comprova que a maior parte da DQO na fase metanogênica é

composta por substâncias orgânicas recalcitrantes e substâncias inorgânicas (metais, cloretos, amônia etc.), as quais não são biodegradáveis na velocidade necessária para contribuir para a medida de DBO_5 (BARLAZ; HAM, 1993; LEE; NIKRAZ, 2014). Baixos resultados de DBO_5 também podem estar relacionados a toxicidade das amostras de lixiviado.

No lixiviado da fase metanogênica, esperava-se que os resultados de DBO_5 fossem bem menores do que os resultados das fases iniciais de decomposição. A DBO_5 no lixiviado ficou na faixa de 4 a 404 mg.L^{-1} , resultando em uma diminuição de 98,45 a 99,99% em relação à DBO_5 inicial (26.150 mg.L^{-1}) do chorume (SCHALCH, 1984). Isto acontece porque os ácidos voláteis e outros compostos orgânicos facilmente biodegradáveis são quase totalmente consumidos e convertidos em gases dentro do próprio maciço. Como as substâncias oxidadas na DBO_5 também são oxidadas no ensaio de DQO, esta última também diminui. A DQO no lixiviado ficou na faixa de 55 a 1.084 mg.L^{-1} , resultando em uma diminuição de 96,93 a 99,84% em relação à DQO inicial (35.250 mg.L^{-1}) do chorume em Schalch (1984). Isto reflete em uma forte correlação entre DBO e DQO (Figura 35).

Figura 35 – Relação entre DBO_5 e DQO no lixiviado do lixão desativado de São Carlos

A DQO diminui menos em relação a DBO_5 , levando à queda na razão DBO/DQO . Considerando as diferenças entre as camadas de resíduos, a relação DBO/DQO variou de 0,04 a 0,60, mas a média deste índice para o lixiviado do maciço foi de 0,30. Considerando os valores iniciais de Schalch (1984), este índice na fase ácida era de 0,74. A redução da biodegradabilidade do lixiviado é um indício que o ecossistema do maciço de resíduos está em perfeito funcionamento. Aumentos na biodegradabilidade podem significar distúrbios no processo, como inibição das arqueas metanogênicas (SOUTO, 2009). Observa-se que houve uma diminuição do

índice de biodegradabilidade, mas as camadas que ficaram menos tempo expostas à atmosfera antes de serem cobertas por uma nova camada de resíduos ainda apresentam índices elevados ($\geq 0,40$). Logo, encontrar resultados de DBO/DQO maiores que 0,1, inclusive nas camadas mais antigas, prova que o lixiviado do lixão Santa Madalena ainda não foi estabilizado. Ressalta-se que, apesar da relação DBO/DQO ser importante, a estabilidade do depósito de resíduos não pode ser obtida apenas com esta avaliação no lixiviado (BARLAZ et al. 2002).

7) Discussão sobre os resultados de NTK, NAT, NO_2 , NO_3

Como o nitrogênio é constituinte principalmente das proteínas e aminoácidos, há íntima ligação entre o nitrogênio e a matéria orgânica em lixiviados. Tanto que para o lixiviado do lixão Santa Madalena foi verificada uma correlação muito forte entre os pares NTK/COD, NAT/COD e NAT/DQO e forte entre os pares NTK/DQO, NTK/DBO e NAT/DBO. Outras fontes menores de nitrogênio são os fertilizantes, produtos de limpeza e produtos para preservação da madeira (FLECK, 2003). A quantificação do nitrogênio é realizada pelo ensaio de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995). No lixiviado avaliado, os resultados de NTK variaram entre 53 e 843 mg.L^{-1} . NTK engloba NAT, N_{org} , NO_2 , NO_3 e outras formas oxidadas de nitrogênio. Entretanto, as formas oxidadas aparecem em concentrações muito baixas devido ao ambiente anaeróbio do maciço. No lixiviado avaliado, os resultados variaram entre 0 e 0,1 mg.L^{-1} para NO_2 e 1 a 73 mg.L^{-1} para NO_3 . Observa-se que as concentrações de nitrato não foram tão insignificantes quanto de nitrito, inclusive foram maiores do que as concentrações de NO_3 detectadas no lixiviado do lençol suspenso e no chorume imóvel. Isto comprova que a oxidação da amônia é iniciada durante o processo de lixiviação do maciço. Entretanto, o aporte significativo de NO_3 e NO_2 acontece quando há recirculação de lixiviado, após este ter passado por um processo efetivo de nitrificação (SOUTO, 2009).

Perdas de nitrogênio na fase gasosa só aconteceriam na forma de N_2 , que é formado a partir de NO_2 e NO_3 . Logo, o nitrogênio amoniacal total (NAT) tende a aumentar com o passar do tempo (FLECK, 2003) e o cálculo de nitrogênio orgânico (N_{org}) pode ser feito por aproximação pela diferença entre NTK e NAT. No lixiviado avaliado, os resultados variaram entre 3 e 239 mg.L^{-1} para N_{org} e 30 a 765 mg.L^{-1} para NAT. Esta última forma de nitrogênio tende a predominar nos depósitos de resíduos

antigos, uma vez que não há nenhum grupo microbiano presente no maciço que o consuma (SOUTO, 2009), logo as concentrações de NAT no lixiviado costumam ser superiores a 100 mg.L^{-1} por décadas (POHLAND; HARPER, 1985; EHRIG, 1988; KJELDSEN et al., 2002). Segundo Chen (1996), o motivo do pH do maciço se manter elevado são também as elevadas concentrações de NAT, devido à formação de bicarbonato de amônio (NH_4HCO_3), o que contribui, inclusive, para aumento da alcalinidade. Por esses motivos, observou-se correlação muito forte entre os pares NTK/NAT, NTK/alcalinidade e NAT/alcalinidade. Através de estudos de toxicidade com lixiviado, Clément e Merlin (1995) também verificaram forte relação entre elevada alcalinidade e altas concentrações de NAT. Os autores ainda concluíram que esta elevada alcalinidade do maciço é responsável por manter grandes quantidades de amônia em sua forma não ionizada, a qual é considerada a mais tóxica para os ecossistemas aquáticos. O perfil avaliado apresentou média de 78% do NTK em forma de NAT e 22% em forma de N_{org} . Kjeldsen et al. (2002) também chamaram atenção para as elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal em depósitos de resíduos e consideraram a amônia como o principal poluente do meio ambiente, por sua quantidade e persistência.

8) Discussão sobre os resultados de PO_4

Durante a decomposição da matéria orgânica, o fósforo também é liberado no maciço de resíduos (DURMUSOGLU; YILMAZ, 2006). As formas de fosfato (PO_4) são encontradas em baixas concentrações no lixiviado devido aos processos de adsorção em frações coloidais e suspensas do maciço e de precipitação com íons metálicos. Investigações sobre o teor de enxofre nos resíduos aterrados mostraram que não há sulfeto suficiente para precipitar a maioria dos metais pesados do conteúdo aterrado (KJELDSEN et al., 2002). Martensson et al. (1999) verificaram que as concentrações de sulfetos encontradas no maciço são suficientes para precipitar apenas 5% dos metais do maciço de resíduos. Logo, fosfatos e hidróxidos também auxiliam nesta precipitação (CHRISTENSEN et al., 1999; REINHART; GROSH, 1998). Contudo, alguma detecção de PO_4 no lixiviado pode acontecer devido à competição dos campos de adsorção com os compostos orgânicos. O lixiviado do lixão Santa Madalena apresentou baixas concentrações de PO_4 , entre a faixa de 0,04 e $6,67 \text{ mg.L}^{-1}$.

9) Discussão sobre os resultados de SO_4

Em condições anaeróbias, o SO_4 é usado pelas bactérias redutoras de sulfato comoceptor final de elétrons, sendo reduzido a sulfeto (BARLAZ; HAM, 1993). A redução do sulfato permite a obtenção de mais energia do que aquela que seria obtida por fermentação ou metanogênese hidrogenotrófica (SOUTO, 2009). Por essa razão, sempre que há SO_4 disponível, ele é rapidamente consumido. Por outro lado, para que SO_4 seja gerado a partir da matéria orgânica, é necessário que haja condições aeróbias. A dificuldade na geração e a facilidade no consumo acarretam em lixiviados pobres em SO_4 . Esta característica foi verificada no lixiviado do lixão Santa Madalena. Todas as amostras resultaram em valores abaixo do limite de detecção para SO_4 . Esta ausência também pode ser explicada de forma simplificada pela relação hidroquímica do sistema de enxofre (HEM, 1985): não existe formação de sulfato no meio redutor combinado com pH elevado. O sistema enxofre em ambientes redutores está presente apenas na forma de sulfetos. No caso de depósitos de resíduos, os sulfetos são removidos do lixiviado ao se combinarem com cátions metálicos formando sulfetos metálicos insolúveis (SCHALCH, 1992; MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995), ou na forma de H_2S por *stripping*.

10) Discussão sobre os resultados dos macrocomponentes iônicos

As elevadas concentrações de NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- e Cl^- conferem a estes o título de macrocomponentes iônicos no lixiviado do lixão Santa Madalena. O título não se aplica apenas para SO_4^{2-} , que apresentou concentrações abaixo do limite de detecção.

11) Discussão sobre a influência da qualidade do solo de São Carlos e a presença de SiO_2 , Mn e Fe no lixiviado

O Brasil, particularmente, possui a maior extensão de latossolos do mundo, formados predominantemente por argilas do tipo caulinita, cujas partículas são revestidas por óxidos de ferro (LEPSCH, 2002). Portanto, por este tipo de solo ser frequentemente usado como material de cobertura de resíduos em aterros controlados e sanitários, explica-se a qualidade diferenciada do lixiviado de aterros brasileiros,

principalmente em termos das concentrações de ferro. Os minerais destas argilas podem ser degradados pelo ácido carbônico presente na água de chuva – que é proveniente do CO₂ atmosférico – e liberar metais que podem ou não vir a fazer parte do lixiviado (SOUTO, 2009). São Carlos é um município caracterizado por ter solos altamente permeáveis, em sua maioria, constituídos por zonas de latossolo-vermelho-amarelo e de areia quartzosa profunda com característica arenosa (BARROS, 2005). A Tabela 30 apresenta as concentrações de alguns metais encontrados no solo de cobertura usado no aterro de São Carlos (SP), que pode ser semelhante ao solo usado para cobertura dos resíduos no lixão Santa Madalena.

Tabela 30 – Concentrações de metais encontradas no solo de cobertura do aterro de São Carlos

Metal	Concentração no solo (mg.kg⁻¹)
Fe	5.500
Cu	50
Zn	32
Mn	29
Ni	< 0,4
Cd	< 0,3
Cr total	< 0,25
Pb	< 0,1

Fonte: ALMEIDA (2005)

Segundo Frascá e Sartori (1998), em termos de massa, os principais elementos presentes nas rochas são: oxigênio (46,6%), silício (28,2%), alumínio (8,2%), ferro (5,6%), cálcio (4,2%) e outros (Na, K, Mg, Ti, P). Todos esses elementos também podem ser lixiviados e vir a fazer parte do lixiviado de depósitos de resíduos (SOUTO, 2009). Portanto, tanto a lixiviação dos solos das áreas circunvizinhas aos depósitos de resíduos, como a lixiviação dos próprios solos usados como material de cobertura podem explicar as elevadas concentrações de SiO₂, Ca, Fe e Mn encontradas no lixiviado do lixão Santa Madalena.

12) Discussão sobre os resultados de Cl⁻ e F⁻

Cloreto e fluoreto possuem alta correlação com Na e K (BJERG; CHRISTENSEN, 1993) e são bastante solúveis (PANAGOULIAS; SILVA FILHO, 2006). Entretanto, a solubilidade do fluoreto nas águas pode diminuir com altas concentrações de Ca (BOYLE, 1992 apud PANAGOULIAS; SILVA FILHO, 2006). Isto foi verificado no lixiviado do lixão Santa Madalena que, é rico em Ca (entre 24 e 434 mg.L⁻¹) e apresentou baixas concentrações de F⁻ (entre 0 e 1,1 mg.L⁻¹). As

concentrações de Na (entre 10 e 535 mg.L⁻¹), K (entre 12 e 495 mg.L⁻¹) e Cl⁻ (entre 11 e 730 mg.L⁻¹) também foram elevadas e apresentaram correlação muito forte ($p \geq 0,90$). O cloreto não está sujeito a transformações químicas ou biológicas no maciço de resíduos, devendo passar pelas camadas mais antigas sem qualquer atenuação significativa (EL-FADEL et al., 2002). Como o Cl⁻ é uma substância não reativa, a diluição e a dispersão hidrodinâmica são os únicos processos que promovem a atenuação deste elemento (ALVES, 2012). Esta característica conservativa levou Heavey (2003) a sugerir seu uso como um indicador do efeito de diluição.

O cloreto também é conhecido por ser um grande interferente na detecção da DQO. Segundo APHA (2012), não se deve usar o método convencional para medir a DQO de amostras com mais de 2.000 mg.L⁻¹ de cloreto. Os resultados de Cl⁻ no lixiviado do lixão Santa Madalena ficaram entre 11 e 730 mg.L⁻¹. Kylefors, Ecke e Lagerkvist (2003) afirmam não ter encontrado influência significativa do cloreto e da amônia na DQO de lixiviados da fase metanogênica. Por outro lado, estes autores concluíram que até um terço da DQO pode ser devido a substâncias inorgânicas, especialmente sulfetos e íons ferrosos (Fe²⁺).

13) Discussão sobre as baixas concentrações de metais

Mesmo em depósitos de resíduos que não receberam resíduos industriais, os metais estão presentes no lixiviado, pois em grande parte dos resíduos domésticos há metais em sua composição. Segundo Santos (2003), a detecção de metais no lixiviado depende do balanço entre os mecanismos que concorrem para sua solubilização e os que agem para a sua retenção no interior do maciço. Ferreira et al. (1985) apud Souto (2009), através de experimentos em coluna, comprovaram que a massa de resíduos é capaz de reter metais, contribuindo para a atenuação significativa de Cr, Ni e Zn, por exemplo. Além disso, o solo usado como material de cobertura contribui para adsorção de alguns metais. Sulfetos, fosfatos e carbonatos contribuem para precipitação dos metais. Devido à maior quantidade de sulfetos no ambiente redutor do maciço, ele se torna o agente complexante mais importante dos depósitos de resíduos. Como a matéria orgânica contribui com a complexação dos metais, dependendo da solubilidade desses compostos, esse fenômeno pode tanto colaborar para o aumento quanto para a diminuição da concentração de metais no lixiviado (SISINNO; MOREIRA, 1996). Compostos orgânicos solúveis podem

aumentar a mobilidade dos metais para fora do aterro. Por outro lado, o metal só estará disponível para agir no meio ambiente caso o complexo seja dissociado.

Portanto, os processos de precipitação, complexação e adsorção dos metais são predominantes em ambientes redutores (condição dos depósitos de resíduos antigos), favorecendo a atenuação dos mesmos (EZAKI, 2004). Por este motivo, médias relativamente baixas de Ag ($0,004 \text{ mg.L}^{-1}$), Cd ($0,02 \text{ mg.L}^{-1}$), Cu ($0,02 \text{ mg.L}^{-1}$), Cr ($0,04 \text{ mg.L}^{-1}$), Pb ($0,05 \text{ mg.L}^{-1}$), Co ($0,08 \text{ mg.L}^{-1}$), Zn ($0,13 \text{ mg.L}^{-1}$), Ni ($0,14 \text{ mg.L}^{-1}$), Al ($0,27 \text{ mg.L}^{-1}$), Sr ($0,29 \text{ mg.L}^{-1}$) e Ba ($0,45 \text{ mg.L}^{-1}$) foram encontradas no lixiviado do lixão Santa Madalena. Apesar disto, algumas concentrações de Cd, Pb, Ba e Ag apresentaram-se acima do valor limite para lançamento do efluente. Baixas concentrações de metais em lixiviados da fase metanogênica é comum e, assim, os metais deixaram de ser os poluentes mais preocupantes de depósitos de resíduos (KJELDSEN et al., 2002).

14) Discussão sobre a similaridade entre as curvas de Fe/Mn/Ca e de COD/DQO/DBO₅/Na/K

Valores de pH e alcalinidade elevados e a predominância de sulfetos no meio diminuem a solubilidade de compostos inorgânicos. Porém, não implica em solubilidade nula. Substâncias inorgânicas continuam sendo dissolvidas e lixiviadas, apenas em menor intensidade. Ferro, manganês, sódio, potássio, sulfato e cloreto podem continuar a ser eliminados do aterro por muitos anos (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995). Metais também podem ser mobilizados caso estejam complexados a substâncias húmicas que sejam arrastadas para fora do aterro (BARLAZ; HAM, 1993).

A presença de matéria orgânica e as condições redutoras do maciço aumentam a mobilidade de Fe e Mn, convertendo suas formas insolúveis Fe^{3+} e Mn^{4+} em formas solúveis Fe^{2+} e Mn^{2+} (CHRISTENSEN et al., 2001), as quais serão transferidas do maciço para o lixiviado. Entretanto, uma brusca diminuição a partir do 3º lisímetro (profundidade 1,8 m) é observada nos gráficos de Fe e Mn, e simultaneamente uma brusca elevação de matéria orgânica (COD, DQO, DBO₅) acontece nas mesmas camadas. Portanto, apesar do ambiente (maciço de resíduos na fase metanogênica) ser favorável à mobilização dos íons Fe e Mn, outros processos predominam sobre a complexação neste meio alcalino, possivelmente a adsorção e a precipitação.

Outro comportamento interessante, também a partir do 3º lisímetro, é a elevação de Na e K, e o decréscimo expressivo de Ca, além de Fe e Mn. Outra explicação seria também a capacidade de troca catiônica nas frações argilosas – observada por Alves (2013) – dos solos de cobertura. Por troca catiônica, pode estar ocorrendo adsorção de Na^+ e K^+ e dessorção de Fe^{2+} , Mn^{2+} e Ca^{2+} na argila dentro do maciço de resíduos. Estes últimos elementos combinam-se com outras espécies, tornando-se insolúveis e precipitam. Quando ocorre a lixiviação do maciço, Fe^{2+} , Mn^{2+} e Ca^{2+} não estão mais disponíveis por estarem precipitados e parte dos cátions Na^+ e K^+ por serem altamente solúveis permanecem solúveis e continuam sendo mobilizados para o lixiviado.

A partir da análise, acredita-se que a existência de Fe^{3+} e Mn^{4+} em depósitos de resíduos antigos é pouco provável. Alves (2013) chegou a uma conclusão semelhante em relação ao ferro, pois após constatar a existência de troca catiônica com dessorção do Fe^{2+} , o autor concluiu que a possibilidade da redução de Fe^{3+} para Fe^{2+} não é tão expressiva na zona metanogênica. Por outro lado, quando o lixiviado contendo Fe entra em contato com condições mais oxidantes fora do maciço, o ferro é oxidado a Fe^{3+} e precipita (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995). Ressalta-se que durante a manipulação das amostras em laboratório, sempre havia formação de corpo de fundo nas amostras L1 e L2 (que tinham as menores alcalinidades, logo não garantiam o tamponamento destas amostras de lixiviado), que possivelmente era a formação de óxidos de ferro que precipitavam na presença de oxigênio.

15) Discussão sobre a qualidade do lixiviado, padrões de lançamento de efluentes e fase do lixão

A qualidade do lixiviado do lixão Santa Madalena é comparada com valores típicos encontrados em lixiviados de aterros na fase metanogênica (Tabela 31).

A idade do lixão Santa Madalena, bem como os resultados de qualidade das amostras de lixiviado (principalmente dos parâmetros pH, alcalinidade, temperatura e NAT) que é semelhante à qualidade do lixiviado de outros depósitos de resíduos na mesma fase (Figura 36), comprovam que o depósito de resíduos encontra-se na fase metanogênica de decomposição.

Figura 36 – Variação de DQO, pH e composição de gases nas diferentes etapas de estabilização de resíduos dispostos em aterros: (I) ajustamento inicial; (II) transição; (III) formação de ácidos; (IV) metanogênica estável; (V) regressiva (Fonte: COTRIM, 1997 *apud* BIDONE; POVINELLI, 1999)

Tabela 31 – Qualidade do lixiviado da camada mais profunda avaliada no lixão desativado

Variáveis Prof (m)	L6	FM1	FM2	VL
pH	7,4 – 8,1	7,5 – 9,0	5,9 – 9,2	5 – 9
Alcalinidade	1220 – 7340	300 – 11500	125 – 20200	-
CE	1220 – 7340	-	100 – 45000	-
DBO ₅	477 – 921	20 – 550	3 – 17200	5,0
DQO	68 – 398	500 – 4500	20 – 35000	-
COD	576 – 1031	-	-	-
PO ₄	19 – 37	-	-	-
NTK	606 – 740	50 – 5000	-	-
NAT	456 – 686	30 – 3000	-	0,5
NO ₂	0 – 0,075	0 – 25	-	1,0
NO ₃	13 – 31	0,1 – 50,0	-	10,0
Ca	46 – 61	20 – 600	-	-
Sr	0,2 – 0,4	0,3 – 7,0	-	-
K	168 – 368	10 – 2500	-	-
Ni	0,06 – 0,16	0,02 – 2,05	1,4	2,0
Mg	19 – 31	40 – 350	-	-
Co	0,06 – 0,15	0,004 – 0,95	-	-
Cl ⁻	260 – 530	100 – 5000	20 – 6900	-
F ⁻	0,3 – 1,1	-	-	-
Ba	0 – 0,9	-	-	1,0
Al	0 – 0,7	-	-	-
Na	155 – 357	50 – 4000	-	-
Zn	0 – 0,1	0,03 – 4,00	35	5,0
Pb	0 – 0,11	0,008 – 1,020	6,7	0,1
Cd	0,002 – 0,036	0,005 – 0,140	0,6	0,01
Fe	0,6 – 3,8	3 – 280	0,01 – 720	15,0
Mn	0,2 – 0,5	0,03 – 45	30	1,0
Cu	0 – 0,274	0,004 – 1,400	2,9	1,0
Cr	0 – 0,06	0,03 – 1,60	1,0	0,05
Ag	0,001 – 0,006	-	-	0,02

Nota₁: com exceção do pH (unidades de pH) e da condutividade elétrica CE ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$), todos os valores estão expressos na unidade $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Nota₂: valores em vermelho estão acima de valor limite VL, permitido para lançamento de efluentes, segundo o Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Nota₄: FM1 e FM2 = valores típicos do lixiviado na fase metanogênica segundo Ehrig (1989) e Souto e Povinelli (2011), respectivamente; NTK = nitrogênio total Kjeldahl, NAT = nitrogênio amoniacal total, DBO₅ = demanda bioquímica de oxigênio, DQO = demanda química de oxigênio, COD = carbono orgânico dissolvido.

De maneira geral, as concentrações de NAT, Ba, Cd, Cr, Pb, Fe, Mn, Ag, NO₃ e DBO₅ estão acima dos valores limites (VL) permitidos para lançamento de efluentes do Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Mas, segundo Souto (2009), à medida que o lixiviado percola pelas camadas do maciço repletas de microrganismos, estes retiram os nutrientes nele disponíveis e liberam seus respectivos produtos de excreção. Assim, o lixiviado eliminado pela base do lixão não é uma mistura do lixiviado produzido nos diversos locais do maciço, mas sim o resultado dos processos que ocorrem nas camadas mais profundas. O líquido que percola primeiro por resíduo novo e depois por resíduo velho tende a refletir as características deste último (BARLAZ; HAM, 1993). Por este motivo, a avaliação sobre os padrões de lançamento deve ser feita com a qualidade do lixiviado coletado na camada mais profunda que deveria ser na profundidade de 10 m. Mas como nesta pesquisa a maior profundidade foi 3,3 m, para este estudo considera-se a qualidade da amostra do lisímetro L6. Porque o lixiviado das camadas mais novas necessariamente passará pelas mais antigas camadas de resíduos. Seguindo este raciocínio, apenas as concentrações de NAT, Cd, NO₃ e DBO₅ (Tabela 31) estão acima dos valores limites (VL) permitidos para lançamento de efluentes do Decreto Estadual nº 8.468 (SÃO PAULO, 1976). Portanto, o lixiviado do lixão não poderia ser lançado no meio antes de tratamento prévio, nem mesmo 18 anos após o encerramento.

6.4. QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A Figura 37 apresenta os perfis construtivos dos poços de monitoramento que foram avaliados nesta pesquisa. As informações do poço PM03 foram baseadas nos dados fornecidos por Álvares (2000), do poço PM29 foram baseadas na observação da instalação e dos poços PM17, PM19 e PM23 foram baseadas nos dados fornecidos por PMSC (2011). Os diferentes tipos de solo onde os poços estão instalados podem ter influenciado nas variações de qualidade das águas subterrâneas na região do lixão.

Figura 37 – Esquema simplificado do perfil construtivo dos poços de monitoramento avaliados nesta pesquisa, com os respectivos níveis da água (N.A.) logo após a perfuração e as respectivas distâncias aproximadas em relação ao PM03. PM03 está a montante do maciço (fica a 25 m do maciço), PM29 está dentro do maciço, PM17 (fica a 34 m do maciço), PM19 (fica a 135 m do maciço) e PM 23 (fica a 140 m do maciço) estão a jusante do maciço.

Para complementar a discussão da mobilização de poluentes e da qualidade das águas subterrâneas, os resultados da qualidade do solo da base do lixão (terreno original) são apresentados na Tabela 32. Comparando a qualidade do solo da base do lixão e o solo da superfície do lixão (branco), observa-se um incremento na base do lixão para pH, DQO, NO_2 , Ca, Sr, Ba, Zn, Pb e Cd, comprovando a poluição direta do solo abaixo dos resíduos. Por outro lado, houve redução de Na, K, Mg, Al, Fe, Cu e Ag na base do lixão, comprovando que o processo de atenuação da poluição para estas variáveis é iniciado ainda dentro do maciço. Os resultados de DQO, Ca, Sr, Ni, Cl^- , Na, Fe e Mn ficaram semelhantes aos resultados médios do último lisímetro da estação experimental (L6). Alcalinidade, CE, NTK, NAT, NO_2 , NO_3 , K, Mg, Co, Na, Cu, Cr e Ag foram menores na base do lixão do que em L6. Ba, Al, Zn, Pb e Cd foram

6. Resultados e Discussão

maiores na base do que em L6. Esta comparação corrobora com a constatação de que ocorrem processos que atenuam alguns poluentes ainda no interior do maciço e que a contaminação é significativa para Ba, Zn, Pb e Cd. Apesar de ser uma norma para classificação de resíduos, a qualidade do extrato de solubilização do solo foi comparada aos valores limites do Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Segundo os valores limites de Cl^- , Ba, Al, Pb, Cd, Fe e Mn, o solo não pode ser considerado inerte, resultado também esperado para a base do lixão que recebe a primeira descarga dos efluentes do maciço, que também não é inerte.

Tabela 32 – Comparação da qualidade do solo da base do lixão desativado com os valores do Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004), com a qualidade do solo de cobertura (branco) e com as médias dos resultados do lixiviado do último lisímetro L6.

Variáveis	Solo (0 m)	Solo (10 m)	Solo (18 m)	Anexo G*	L6 _m
pH	6,8	8,1	8,0	-	7,7
Alcalinidade	-	245	275	-	2457
CE	-	1986	1542	-	5445
DQO	193	578	267	-	650
COD	-	211	261	-	767
SiO_2	-	10	7	-	28
NTK	-	46	108	-	606
NAT	-	12	12	-	548
NO_2	0,049	0,24	0,02	-	0,02
NO_3	-	1,1	1,3	10,0	18
Ca	8	58	57	-	54
Sr	0,02	0,21	0,16	-	0,28
K	202	170	134	-	247
Ni	0,13	0,16	0,22	-	0,10
Mg	1055	11	12	-	26
Co	0,03	0,06	0,05	-	0,11
Cl^-	-	400	225	250	409
Ba	nd	0,9	0,7	0,7	0,4
Al	45	0,6	0,6	0,2	0,3
Na	376	179	126	200,0	242
Zn	0,1	0,2	1,3	5,0	0,04
Pb	0,08	0,18	0,26	0,01	0,05
Cd	0,045	0,082	0,580	0,005	0,020
Fe	38	0,6	2,8	0,3	2,6
Mn	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3
Cu	0,02	nd	nd	2,0	0,063
Cr	nd	nd	0,01	0,05	0,02
Ag	0,003	nd	nd	0,05	0,003

Com exceção de pH e CE ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$), todas as variáveis estão em $\text{mg}.\text{L}^{-1}$. nd = resultado menor que valor do limite de detecção. Em vermelho estão destacados os resultados acima dos valores do Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

A qualidade das águas subterrâneas é apresentada por gráficos (Figura 38) que colocam em sequência os poços em relação ao maciço do lixão e ao fluxo das águas subterrâneas e drenagem superficial. Desta forma, o PM03 encontra-se à montante do maciço, o PM29 no interior do maciço e os poços PM17, PM19 e PM 23, do mais próximo ao mais distante, a sua jusante. O fluxo das águas subterrâneas na região dos poços amostrados é diferente nos períodos secos e chuvosos, como demonstrado no Anexo 3.

Figura 38 – Resultados da qualidade das águas subterrâneas nos poços a montante (PM03), dentro (PM29) e a jusante (PM17, PM19, PM23) do maciço do lixão desativado de São Carlos. Com exceção de pH e CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), todas as variáveis estão em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. VMP = valor máximo permitido pela Portaria nº 2.914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011) e VI = valor de intervenção das Decisões de Diretoria nº 195 e nº 045 (CETESB, 2005, 2014a). (CONTINUA)

6. Resultados e Discussão

Figura 39 – Resultados da qualidade das águas subterrâneas nos poços a montante (PM03), dentro (PM29) e a jusante (PM17, PM19, PM23) do maciço do lixão desativado de São Carlos. Com exceção de pH e CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), todas as variáveis estão em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. VMP = valor máximo permitido pela Portaria nº 2.914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011) e VI = valor de intervenção das Decisões de Diretoria nº 195 e nº 045 (CETESB, 2005, 2014a). (CONTINUA)

Figura 39 – Resultados da qualidade das águas subterrâneas nos poços a montante (PM03), dentro (PM29) e a jusante (PM17, PM19, PM23) do maciço do lixão desativado de São Carlos. Com exceção de pH e CE ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$), todas as variáveis estão em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. VMP = valor máximo permitido pela Portaria nº 2.914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011) e VI = valor de intervenção das Decisões de Diretoria nº 195 e nº 045 (CETESB, 2005, 2014a). (FIM)

A principal observação é que para a maioria dos elementos há elevação das concentrações no poço PM29, em relação ao poço PM03. Logo após, percebe-se a diminuição destas concentrações nos poços a jusante, sendo mais evidente nos poços mais afastados (PM19 e PM23). Estes resultados comprovam que o aquífero abaixo do maciço de resíduos está contaminado por poluentes oriundos dos efluentes do lixão desativado de São Carlos e que parte desta poluição é atenuada com o afastamento do maciço. Os resultados de Cr, Cd, Al, Ni, Fe, Mn, Pb e NAT e alguns resultados de Co e NO₃ apresentaram-se acima do valor máximo permitido (VMP) pela Portaria nº 2.914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011) e/ou acima do valor de intervenção (VI) para águas subterrâneas das Decisões de Diretoria nº 195 e nº 045 (CETESB, 2005, 2014a). Entretanto, com exceção do Mn e NAT que não excederam o VMP no poço a montante PM03, todos os demais excederam o limite inclusive em PM03. Portanto, a não potabilidade das águas subterrâneas da região não se deve apenas ao lançamento dos efluentes do lixão.

Ao observar o acréscimo de poluentes nas águas do poço PM29, fica evidente que pH, alcalinidade, CE, Na, K, Cl⁻, DQO, DBO₅, NTK, NAT, Ca, Mg, Sr e Fe são as principais parâmetros de qualidade das águas alterados pela presença do lixão. As maiores concentrações de NO₂ e NO₃ no poço PM17, a jusante mais próxima do maciço de resíduos, também é consequência da presença do lixão, uma vez que para haver formação dos mesmos, deve ocorrer um afastamento das condições anaeróbias do maciço. Porém, ressalta-se que pode haver aporte de NO₃ de outras fontes, como da plantação de goiabas. Entretanto, ao observar as concentrações de PO₄, Mn e Fe nos demais pontos de amostragem e nos diferentes períodos de amostragem, pode-se afirmar que estes elementos não alteram a qualidade das águas subterrâneas somente com o lançamento dos efluentes do lixão, mas pode haver contribuições de outras fontes. Já as elevações de Zn, Ni, Mn, Fe, Al, Cu, Cd, Ba, Cr, Ag, Co, Pb e NO₂ mostram-se diretamente relacionadas a drenagem subsuperficial e superficial de toda área ao entorno do lixão, incluindo as áreas a montante. Adicionalmente, ressalta-se que a análise de *Escherichia coli* detectou estes microrganismos apenas no poço PM03 (19 quantidades.100mL⁻¹, que é acima do VMP), na amostragem de fevereiro/2013, reforçando a hipótese de que há alteração na qualidade das águas por contribuição da drenagem das áreas de pastagem e das fossas sépticas da região.

Zn, Al, Cu, Ba, Cr, Ag, Co, Pb, Mn e Fe não apresentaram padrão. Observa-se que destas variáveis, foram identificadas plumas de contaminação para Al (extensão

aproximada de 255 m), Co (283 m), Pb (235 m), Mn (345 m) e Fe (407 m) em PMSC (2011). Sobre a dependência sazonal, observa-se que há uma variação bastante evidente para Ag, Cr, Cd, Ba, Cu, Al, Ni, Zn, CE, Cl⁻, DQO, DBO₅, Co, Pb, Mn e Fe, entre a estação chuvosa (dezembro/2012 e fevereiro/2013) e seca (abril/2013 e julho/2013). Portanto, independente da fonte poluidora, estes elementos inorgânicos e a matéria orgânica são mobilizados com mais intensidade no período chuvoso. Também é interessante comparar (Tabela 33) a qualidade da água do poço PM29 com a qualidade do lixiviado do lisímetro mais profundo analisado neste estudo.

Tabela 33 – Comparação da qualidade das águas subterrâneas do poço dentro do maciço PM29 com os valores limites (VMP e VI) e com a qualidade do lixiviado L6 da camada mais antiga de resíduos

Variáveis	L6	PM29	VMP	VI
pH	7,4 – 8,1	6,8 – 7,0	-	-
Alcalinidade	1220 – 7340	445 – 1485	-	-
CE	1220 – 7340	1067 – 2084	-	-
DQO	477 – 921	118 – 206	-	-
DBO	68 – 398	11 – 19	-	-
COD	576 – 1031	-	-	-
SiO ₂	19 – 37	-	-	-
NTK	606 – 740	84 – 105	-	-
NAT	456 – 686	66 – 81	1,5	-
NO ₂	0 – 0,075	0,002 – 0,012	1,0	-
NO ₃	13 – 31	2,5 – 4,8	10	10
Ca	46 – 61	18 – 57	-	-
Sr	0,2 – 0,4	0,2 – 0,3	-	-
K	168 – 368	38 – 77	-	-
Ni	0,06 – 0,16	0,2 – 0,3	0,07	0,07
Mg	19 – 31	8 – 17	-	-
Co	0,06 – 0,15	0,06 – 0,08	-	0,07
Cl ⁻	260 – 530	70 – 235	250	-
Ba	0 – 0,9	0,3	-	0,7
Al	0 – 0,7	0,6	0,2	0,2
Na	155 – 357	35 – 76	200	-
Zn	0 – 0,1	0,1 – 0,2	5,0	1,8
Pb	0 – 0,11	0,14 – 0,33	0,01	0,01
Cd	0,002 – 0,036	0,051 – 0,202	0,005	0,005
Fe	0,6 – 3,8	18 – 74	0,3	0,3
Mn	0,2 – 0,5	0,5 – 1,8	0,1	0,4
Cu	0 – 0,274	0,012	2,0	2,0
Cr	0 – 0,06	0,05 – 0,10	0,05	0,05
Ag	0,001 – 0,006	0,002 – 0,019	-	0,05

Nota₁: Com exceção de pH e CE ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$), todas as variáveis estão em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. nd = resultado menor que valor do limite de detecção; VPM = valor máximo permitido pela Portaria nº 2.914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011); VI = valor de intervenção das Decisões de Diretoria nº 195 e nº 045 (CETESB, 2005, 2014a); Nota₂: em vermelho são os valores que ultrapassaram VI

Esta comparação mostra que a maioria das variáveis foi atenuada nas águas subterrâneas de PM29 (pH, alcalinidade, CE, DQO, DBO, NTK, NAT, NO₂, NO₃, K, Mg, Cl⁻, Ba e Na). Ca, Sr, Co, Al e Zn ficaram semelhantes no lixiviado e na água subterrânea, mostrando maior mobilidade ou menor retenção dessas espécies. Ni, Pb,

Cd, Fe, Mn e Ag foram encontrados em maior quantidade na água subterrânea, mostrando mudanças de composição dessas espécies químicas após a mistura do lixiviado com a água subterrânea.

Outra comparação relacionada às águas subterrâneas da região do lixão Santa Madalena, foi feita entre os resultados desta pesquisa com os resultados de pesquisas anteriores (MENEZES, 1995; GADOTTI, 1997; LOPES, 2007). Nesta análise, percebeu-se que a qualidade das águas subterrâneas nos poços a montante, dentro e a jusante do maciço do lixão foi sendo alterada ao longo dos anos. Os resultados de Menezes (1995) refletem a qualidade das águas subterrâneas quando o lixão ainda estava em operação (Tabela 7). Os resultados de Gadotti (1997) refletem a qualidade das águas subterrâneas quando o lixão estava sendo encerrado (Tabela 8). Os resultados de Lopes (2007) refletem a qualidade das águas subterrâneas 10 anos após o encerramento do lixão (Tabela 9). E os resultados deste trabalho, a ser referido nesta parte como Shinzato (2014) refletem a qualidade das águas subterrâneas 17 anos após o encerramento do lixão (Figura 38). Alcalinidade, pH, CE, DQO, DBO₅, NTK, NAT, NO₃, Fe, Mn, Ca, Mg, Ba, Cl⁻ e PO₄ puderam ser comparados e as principais observações sobre as alterações na qualidade ao longo dos anos são:

(1) nos poços a montante do maciço do lixão, em relação às pesquisas anteriores houve aumento de todas as variáveis nas amostras avaliadas por Shinzato (2014). As maiores elevações foram para alcalinidade, CE, Fe, Ca, Mg, Cl⁻, NTK, NO₃, DBO₅ e DQO;

(2) nos poços dentro do maciço do lixão, com exceção de pH, CE e Ba que não sofreram alterações ao longo do tempo, as demais variáveis aumentaram em Shinzato (2014), sendo que as maiores elevações foram em Fe, Ca, Mg, Cl⁻, NTK, NAT, NO₃ e DQO;

(3) nos poços a jusante do maciço do lixão, houve redução de alcalinidade, pH e CE e aumento nas demais variáveis em Shinzato (2014), sendo que as maiores elevações foram em Fe, Cl⁻, NTK, NAT, NO₃ e DQO.

6.5. PREVISÃO DAS ZONAS REDOX NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os critérios apresentados por Fetter (1999) e Christensen et al. (2001) para determinação das zonas-redox formadas a partir de um depósito de resíduos sólidos

serviram de embasamento teórico para a previsão dos ambientes geoquímicos nas águas subterrâneas do lixão Santa Madalena. Como as amostras dos poços não foram filtradas e nem todos os parâmetros indicados pelos autores foram medidos, uma abordagem diferenciada foi aplicada nesta avaliação para previsão dessas zonas redox. As concentrações de NAT foram usadas para previsão das zonas aeróbia e metanogênica, e as concentrações de Mn foram usadas para previsão das zonas ferro-mangânês-redutora.

Quanto ao NAT, observa-se que não houve diferenças significativas para as concentrações de NAT nas amostras de lixiviado bruto e filtrado. Logo, acredita-se que as concentrações de NAT detectadas nas amostras brutas de águas subterrâneas sejam similares às concentrações de suas frações dissolvidas. Ressalta-se aqui que quando é mencionada a palavra dissolvida nesta tese, refere-se a frações que passaram pelo filtro 0,45 μm . Ao considerar que as águas subterrâneas da área de estudo estão sendo impactadas pelo lixiviado de um lixão na fase metanogênica, sabe-se que em ambientes redutores há predominância da amônia, logo elevadas concentrações de NAT indicam uma possível formação da zona metanogênica. Por outro lado, sabe-se que em ambientes aeróbios, a amônia é facilmente convertida em NO_2 e NO_3 , logo baixas concentrações de NAT indicam uma possível formação da zona aeróbia. As concentrações de NO_2 e NO_3 não foram usadas para auxiliar na previsão da zona aeróbia, mas foram usadas para indicar ambientes em condições oxidativas.

Quanto ao Mn, observa-se que não houve diferenças significativas para as concentrações de Mn nas amostras de lixiviado bruto e filtrado. Logo, as concentrações de Mn detectadas nas amostras brutas de águas subterrâneas são similares às de suas frações dissolvidas. A redução das concentrações de Mn indica uma possível formação da zona ferro-mangânês-redutora, uma vez que o Fe e Mn apresentaram características semelhantes em todas as amostras. Observa-se que as diferenças para as concentrações de Fe nas amostras de lixiviado bruto e filtrado foram bastante significativas e, por este motivo, associado aos elevados resultados de Fe em todos os poços (característica de contribuição da lixiviação do solo da região que é rico em ferro). Estas concentrações não foram usadas para auxiliar na previsão da zona ferro-redutora. A Tabela 34 mostra as observações sobre cada parâmetro e a previsão das zonas redox em todos os poços amostrados.

6. Resultados e Discussão

Tabela 34 – Análise dos íons para previsão das zonas redox nas águas subterrâneas do lixão desativado de São Carlos

Variáveis	PM03	PM29	PM17	PM19	PM23
NAT/NH ₄ ⁺	Baixa []	Elevação na []	Redução na []	Forte redução na []	Baixa []
NO ₂	[] detectada	[] detectada	Forte oxidação	Diminuição da oxidação	[] próxima ao nd
NO ₃	[] detectada	[] detectada	Forte oxidação	Diminuição da oxidação	[] detectada
Mn ²⁺		Elevação na []	Aumento e redução na []	Forte redução na []	Elevação na []
Zona (previsão)	Aeróbia	Metanogênica	Transição	Fe-Mn-redutora	Transição Aeróbia?

[]: concentração; nd: limite de detecção

As zonas-redox previstas e estimadas para a área avaliada, com base nas avaliações aproximadas e específicas para este depósito de resíduos, foram: a montante do maciço (com base na qualidade da água do PM03), uma zona aeróbia; dentro e abaixo do maciço, uma zona metanogênica (com base na qualidade da água do PM29 e corroborando com a fase do lixão); e a jusante afastada do maciço (com base na qualidade da água do PM19), uma zona redutora de ferro e/ou manganês. Ressalta-se que à jusante imediata do maciço, é provável que ocorra uma zona de transição, onde há o aumento de condições oxidantes, mas que não contribui para a oxidação da amônia, como também não contribui para redução significativa das concentrações de Fe e Mn. A jusante mais distante do maciço aparece outra zona de transição, mas é possível que seja um ambiente preparatório para o retorno das condições aeróbias do aquífero.

Os dois principais setores de impacto do lixiviado na água subterrânea foram identificados sob o maciço de resíduos (PM29) e a jusante nas imediações do maciço (PM17). Abaixo do maciço, o lixiviado provavelmente atinge a água subterrânea em toda a extensão da base do lixão. Nesse setor, como o fluxo subterrâneo é descendente, a pluma formada é levada para porções mais profundas do aquífero na direção NW. À jusante próxima do maciço, o lixiviado forma pluma na direção da plantação de goiaba e em direção ao córrego São José, atingindo áreas residenciais próximas ao lixão (PMSC, 2011).

Na zona aeróbia não foram identificadas alterações na qualidade das águas em decorrência do lixão desativado, mas foi detectada alteração devido à drenagem superficial e subsuperficial da área a montante. Nessa zona, as águas possuem baixa condutividade elétrica, contém nitrato e são empobrecidas em sulfato e cloreto. Os parâmetros Co, Pb, Fe, Ni, Al, Cd e Cr são de interesse ambiental pois apresentaram concentrações superiores aos valores de referência considerados.

Na zona metanogênica ocorre um aumento das concentrações de praticamente todas as substâncias dissolvidas (refletindo numa elevada condutividade elétrica das águas subterrâneas) e um aumento das concentrações de alcalinidade, Na, K, Cl⁻, NAT, PO₄, Ca, Mg, Sr e Mn em relação às águas de montante, tornando as águas subterrâneas bicabornatadas sódico-potássicas. As elevadas concentrações de NH₄⁺, Mn²⁺ e, possivelmente, Fe²⁺ estão relacionadas à oxidação da matéria orgânica associada à redução do NO₃, Fe³⁺ e Mn⁴⁺. A grande disponibilidade de K⁺ e Na⁺ possibilitam a troca iônica envolvendo a adsorção dessas espécies e a dessorção de Fe²⁺, Mn²⁺, Ca²⁺ e Sr²⁺. As águas desta zona apresentam concentrações mais elevadas de HCO₃⁻, Mn²⁺, Ca²⁺, Fe²⁺ e Mg²⁺, que juntamente com o pH próximo da neutralidade, geram condições para a precipitação de sulfetos metálicos. Os parâmetros Co, Pb, Mn, Fe, Ni, Al, Cd e Cr são de interesse ambiental pois apresentaram concentrações superiores aos valores de referência considerados.

Na zona redutora de ferro e manganês, a redução das concentrações de Na e K se deve à adsorção dessas substâncias na zona metanogênica. As principais reações redox identificadas nessa zona são relacionadas à oxidação da matéria orgânica com redução do Fe³⁺, Mn⁴⁺ e Mn³⁺. A redução das concentrações de NH₄ também decorre de oxidação (gerando NO₃) e de adsorção. O bicarbonato (através da alcalinidade) tem sua atenuação controlada por precipitação de compostos carbonáticos dentro do maciço de resíduos e no setor a jusante do maciço. As significativas reduções das concentrações de Na e Cl⁻ no setor de jusante estão mais relacionadas à dispersão e diluição, sendo que esta diluição provavelmente ocorre por mistura com águas subterrâneas e com águas da drenagem subsuperficial. Os parâmetros Co, Pb, Fe, Ni, Al, Cd e Cr são de interesse ambiental pois apresentaram concentrações superiores aos valores de referência considerados.

7. CONCLUSÕES

O conteúdo do maciço de resíduos do lixão desativado de São Carlos é composto por resíduos aterrados, solo de cobertura e chorume imóvel. Os resíduos aterrados foram classificados como não inertes, segundo ensaio e padrões da NBR 10.004 (ABNT, 2004). O chorume imóvel é um líquido denso com altas concentrações de poluentes que fica estagnado em pequenas poças aprisionadas entre resíduos plásticos. Neste sentido, descobriu-se que os resíduos plásticos assumem despropositadamente a função de impermeabilização parcial do terreno em lixões e aterros controlados, evitando o lançamento de um efluente com elevadas cargas de poluente para o meio.

A qualidade das frações sólida e líquida do maciço variou bastante entre as camadas de resíduos de diferentes idades de deposição, mostrando um acréscimo nas concentrações de poluentes na camada que ficou menos tempo exposta a céu aberto. A mobilização de poluentes é significativa a partir da lixiviação das frações sólidas do maciço de resíduos, principalmente para Fe, Ca, Mg, K, Na, Ni, Zn, Pb e Cd.

No lixiviado do lixão Santa Madalena foi detectado pH levemente alcalino, potencial redox negativo, elevada alcalinidade, presença de componentes orgânicos e inorgânicos remanescentes e alta condutividade elétrica. Esta última demonstra evidente processo de mobilização de metais e componentes iônicos, principalmente NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Cl^- e HCO_3^- . Apesar da idade do depósito de resíduos, a mobilização de metais não foi suprimida. O constante lançamento dos efluentes do lixão polui diretamente o solo abaixo dos resíduos, com incremento de pH, DQO, NO_2 , Ca, Sr, Ba, Zn, Pb e Cd. Concentrações de nitrogênio amoniacal, Cd, Cr, Pb, NO_3 e DBO_5 apresentaram-se acima dos valores permitidos para lançamento de efluentes do Decreto Estadual nº 8.468. Deste modo, o lixiviado do lixão não poderia ser lançado no meio antes de tratamento prévio, nem mesmo 18 anos após o encerramento.

A idade do depósito de resíduos, juntamente com a qualidade do lixiviado, principalmente as variáveis pH, alcalinidade, temperatura e nitrogênio amoniacal, indicam que o lixão Santa Madalena está ainda na fase metanogênica de decomposição. A qualidade do conteúdo aterrado corrobora com esta conclusão. A fase metanogênica de decomposição é responsável por manter condições redutoras e de tamponamento do maciço de resíduos. Estas características controlam as reações redox ocorrentes no interior do maciço e a qualidade dos efluentes liberados pelo lixão.

Os principais processos relacionados a mobilização ou a retenção de poluentes no interior do maciço de resíduos são: aprisionamento do chorume imóvel pelo material plástico; formação de espécies precipitadas, complexadas e adsorvidas, principalmente com Al, Ba, Cu, Fe, Cd, Pb, Zn, PO_4 e SiO_2 ; processos ou reações que consomem Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Cu e Ag, os quais são atenuados ainda dentro do maciço; redução de espécies de metais, tornando-os menos tóxicos; inibição da oxidação da amônia, que é o estado do nitrogênio mais prejudicial ao meio ambiente.

A qualidade das águas subterrâneas da região está sendo alterada com o passar dos anos, as amostras analisadas dentro e a jusante do maciço do lixão demonstraram que houve um acréscimo significativo de Fe, Ca, Mg, Cl^- , NTK, NAT, NO_3 e DQO. Em relação ao lançamento do lixiviado nas águas subterrâneas, concluiu-se que a maior mobilização ou a menor retenção acontece para as espécies Ca, Sr, Co, Al, Zn, Ni, Pb, Cd, Fe, Mn e Ag. As concentrações de Co, NO_3 , Cr, Cd, Al, Ni, Fe, Mn, Pb e NAT apresentaram-se acima do valor máximo permitido pela Portaria nº 2.914 e/ou acima do valor de intervenção das Decisões de Diretoria nº 195 e nº 045. Apesar disto, foi constatado que a elevação das concentrações causada pelo lixão é atenuada quando se afasta do maciço.

As zonas-redox previstas e estimadas para a área avaliada, com base em avaliações aproximadas e específicas para este depósito de resíduos, foram: uma zona aeróbia à montante do maciço; uma zona metanogênica dentro e abaixo do maciço; e uma zona redutora de ferro e/ou manganês à jusante afastada do maciço. Ressalta-se que a jusante mais próxima do maciço, é provável que ocorra uma zona de transição, onde há o aumento de condições oxidantes, mas que não contribui para a oxidação da amônia, como também não contribui para redução significativa das concentrações de Fe e Mn. A jusante mais distante do maciço aparece outra zona de

7. Conclusões

transição, mas é possível que seja um ambiente preparatório para o retorno das condições aeróbias do aquífero.

Razões de DBO/DQO maiores que 0,1 no lixiviado provaram que o efluente líquido do lixão Santa Madalena ainda não foi estabilizado. Apesar de estar desativado há 18 anos, o maciço de resíduos ainda é fonte primária de poluentes, com potencial remanescente de contaminação. A análise do conjunto de dados de qualidade do conteúdo aterrado e do lixiviado comprovou uma significativa mobilização de poluentes dentro do maciço de resíduos do lixão desativado de São Carlos/SP. Portanto, o monitoramento da área não pode ser descontinuado e ações de recuperação da área devem ser iniciadas, o quanto antes, para mitigação de seus impactos ambientais.

A metodologia de avaliação usada neste trabalho pode ser aplicada em outros lixões e aterros controlados no Brasil. A instalação e o monitoramento da estação experimental dentro do maciço de resíduos foram bastante onerosos, mas possibilitou a coleta de dados primários importantes para a avaliação do estado real de um lixão abandonado no país. Para o início da padronização de métodos de avaliação de depósitos de resíduos inadequados, sugere-se o cumprimento de pelo menos 3 etapas de verificação: (1) Se os resíduos aterrados estão inertes; (2) Se o lixiviado atende aos padrões de lançamento de efluentes; (3) Se as águas subterrâneas da região atendem aos padrões de potabilidade. No caso do atendimento destas 3 condições, os cuidados de pós-encerramento poderão ser minimizados (monitoramento da cobertura final) ou até mesmo concluídos.

8. RECOMENDAÇÕES

Uma das metas elencadas pela ONU para o desenvolvimento do milênio é reduzir a proporção da população sem acesso à água potável e ao saneamento básico. Muitas vezes, questões de saneamento são tratadas separadamente das questões hidrológicas ou hidrogeológicas. A união de esforços dessas áreas de pesquisa pode contribuir para a proteção dos recursos hídricos de forma mais eficaz, uma vez que a disposição final dos resíduos interfere diretamente sobre a qualidade das águas e a saúde dos indivíduos.

Existe uma necessidade urgente por pesquisas com foco na padronização de métodos de avaliação de lixões e na determinação de critérios que definam quando os depósitos de resíduos desativados, incluindo lixões, aterros controlados e aterros sanitários, deixam de ser uma ameaça para a saúde humana e o meio ambiente. Esta indefinição dificulta a avaliação dos projetos de encerramento de depósitos de resíduos, bem como a decisão de estender ou reduzir o período de monitoramento da área após o encerramento.

No intuito de auxiliar os projetos de encerramento e recuperação de depósitos inadequados, recomenda-se que outros depósitos de resíduos desativados sejam avaliados para aumentar este banco de dados. Tendo em vista que a metodologia aplicada neste trabalho foi bastante onerosa, sugere-se ainda que as avaliações de depósitos de resíduos sejam realizadas em parceria entre os gestores (prefeituras e secretarias) e universidades.

De maneira mais específica, estudos no lixão Santa Madalena devem ser continuados e como principais sugestões estão: (1) monitoramento contínuo do nível dos poços de monitoramento da área do lixão, através da instalação de *divers*, para a elaboração de um mapa potenciométrico representativo da área do lixão; (2) levantamento de dados meteorológicos mais precisos através da instalação de uma estação meteorológica no lixão para estimativa de um balanço hídrico no maciço e da quantidade de produção de lixiviado; (3) coleta das águas subterrâneas com sistema

low flow e análises de amostras brutas e filtradas para confirmação e delimitação dos ambientes geoquímicos nas águas subterrâneas da região; (4) análises de outras variáveis importantes para estudos hidrogeoquímicos, como potencial redox, cloreto, metano, gás sulfídrico, metais nas formas mais específicas, oxigênio dissolvido, entre outros no lixiviado e nas águas subterrâneas; (5) investigações sobre a redução do pH nos poços de jusante do maciço do lixão; (6) investigações sobre o comportamento do ferro dentro do maciço, no lixiviado e nas águas subterrâneas de maneira mais detalhada, já que é um elemento encontrado em altas concentrações no lixão.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETRE - Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. **Aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários**. Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.abetre.org.br/biblioteca/publicacoes/publicacoes-abetre/apresentacao-abetre-fgv>>. Acesso em: 20 maio 2014.

ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET. **A história da resina PET**. ABIPET, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.abepet.com.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=46>> Acesso em: 15 fevereiro 2012.

ABLP – Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. Aterros sanitários – uma maneira ambientalmente adequada para o destino final de resíduos. **Limpeza Pública**, v. 62, p. 16-32, 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7.181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 13p.

_____. **NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, RJ, 1992a. 7p.

_____. **NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, RJ, 2004a. 77p.

_____. **NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ, 2004b. 6p.

_____. **NBR 10.644: Águas - Determinação de resíduos (sólidos) - Método gravimétrico**. Rio de Janeiro, RJ, 1989. 7p.

_____. **NBR 12.614: Águas - Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) - Método de incubação (20°C, cinco dias) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 1992b. 5p.

_____. **NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 12p.

_____. **NBR 15847: Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento - Métodos de purga**. Rio de Janeiro, RJ, 2010a. 15p.

_____. **NBR 15.849: Resíduos sólidos urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, RJ, 2010b. 24p.

ABREU, A.E.S. **Determinação da resistência e da deformabilidade de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. 86p. Qualificação (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

AKUTSU, J. **Emprego de reator de leito fluidificado para tratamento biológico anaeróbico de águas residuárias**. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

ALMEIDA, T.L. **Implicações ambientais dos processos de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 192p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ÁLVARES, C.M.B. **Contribuição ao conhecimento do meio físico da região do lixão de São Carlos-SP, através de estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos**. 158p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ALVES, C. F. DE C.; BERTOLO, R. A. Geoquímica de águas subterrâneas impactadas por aterros de resíduos de resíduos sólidos. **Águas Subterrâneas**, v. 26, p. 43–64, 2012.

ALVES, C.F.C. **Geoquímica das águas subterrâneas de um aterro de resíduos sólidos em Araras, SP**. 102p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington DC: American Water Works Association and Water Environment Federation, 2012. 1496p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D4696: Standard Guide for Pore-Liquid Sampling from the Vadose Zone**. Pensilvânia, EUA, 2008. 32p.

ATTAL, A.; AKUNNA, J.; CAMACHO, P.; SALMON, P.; PARIS, I. Anaerobic degradation of municipal wastes in landfill. **Water Sci. Technol.** v.25. n.7. p.243-253. 1992.

BAEDECKER, M. J.; BACK, W. Modern marine sediments as a natural analog to the chemically stressed environment of a landfill. **Journal of Hydrology**, v. 43, p. 393- 414. 1979a.

BAEDECKER, M. J.; BACK, W. Hydrogeological Process and Chemical Reactions at a Landfill. **Groundwater**. v. 17. n. 5. p. 429-445. 1979b.

BALDOCHI, V.M.Z. **Comportamento dos ácidos voláteis no processo de estabilização anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário**. 173p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

BARLAZ, M.A.; HAM, R.K. **Leachate and gas generation**. In: DANIEL, D.E. (Ed.). *Geotechnical practice for waste disposal*. London, UK: Chapman & Hall, 1993. Cap. 6.

BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; KJELDSSEN, P.; GABR, M. A.; BORDEN, R. C. Critical evaluation of factors required to terminate the postclosure monitoring period at solid waste landfills. **Environ. Sci. Technol.** v.36. n.16. p. 3457-3464, 2002.

BARNES, K.K.; CHRISTENSON, S.C.; KOLPIN, D.W.; FOCAZIO, M.J.; FURLONG, E.T.; ZAUGG, S.D.; MEYER, M.T.; BARBER, L.B. Pharmaceuticals and other organic waste water contaminants within a leachate plume downgradient of a municipal landfill. **Groundwater Monitoring and Remediation**, v. 24, n. 2, p. 119- 126, 2004.

9. Referências Bibliográficas

- BARROS, R.M. **Previsão de enchentes para o plano diretor de drenagem urbana de São Carlos (PDDUSC) na bacia escola do córrego do Gregório**. 279p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- BAUN, D.; CHRISTENSEN, T. Speciation of Heavy Metals in Landfill Leachate: A Review. **Waste Management & Research**, n. 22, p. 3-23, 2004.
- BAUN, A.; LEDIN, A.; REITZEL, L. A.; BJERG, P. L.; CHRISTENSEN, T. H. Xenobiotic organic compounds in leachates from ten Danish MSW landfills-chemical analysis and toxicity tests. **Water research**, v. 38, n. 18, p. 3845-58, 2004.
- BEAL, L.L. **Tratamento anaeróbio de efluente de curtume de acabamento associado a membranas de micro e ultrafiltração**. 221p. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004.
- BERTOLO, R.A. **Hidrodinâmica e hidrogeoquímica da zona não saturada do Aquífero Adamantina em Urânia - SP**. 225p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- BESERRA, L.B.S.; SOUZA, I.M.F.; BARBOSA, D.G.; ATHAÍDE JÚNIOR, G.B.; NÓBREGA, C.C.; GADELHA, C.L.M.; RIBEIRO, W.L.B.; MOURA, A.H.M. Estudo da qualidade das águas subterrâneas na região próxima ao antigo lixão do Roger em João Pessoa - PB. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007. 10p.
- BIDONE, F. R. A., POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120p.
- BJERG, P.; RUGGE, K.; PEDERSEN, J.; CHRISTENSEN, T. Distribution of Redox- Sensitive Groundwater Quality Parameters Downgradient of a Landfill (Grindsted, Denmark). **Environmental Science & Technology**, v. 29, n. 5, p. 1387-1394, 1995.
- BJERG, P.; CHRISTENSEN, T. A field experiment on cation exchange-affected multicomponent solute transport in a sandy aquifer. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 12, p. 269-290, 1993.
- BJERG, P. L.; KJELDSSEN, P.; CHRISTENSEN, T. H.; COZZARELLI, I. The Groundwater Geochemistry of Waste Disposal Facilities. In: H. D. Holland; K. K. Turekian; Treatise on Geochemistry. 1ª ed., p.579-612. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- BOSSOLAN, N.R.S. **Aspectos ecológicos das populações bacterianas em águas subterrâneas sob o efeito de um aterro controlado - São Carlos, SP**. 98p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1993.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010a. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago.2010. Seção 1. p. 3.
- _____. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010b. Regulamenta a Lei nº 12.305. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez.2010. p. 1. (Edição Extra)
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos

e águas subterrâneas no estado de São Paulo - 2005, em substituição aos valores orientados de 2001. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, dez.2006.

_____. Decisão da Diretoria nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007. Dispõe sobre o procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 27 jun.2007.

_____. **Áreas contaminadas: Relação de áreas contaminadas**. CETESB, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacoes-de-areas-contaminadas/4-Relacoes-de-Areas-Contaminadas>>. Acesso em: 11 janeiro 2010.

_____. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. CETESB, São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-ACs/7->>. Acesso em: 11 janeiro 2010.

_____. Decisões de Diretoria nº 045/2014/E/C/I, de 20 de fevereiro de 2014a. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2014, em substituição aos Valores Orientadores de 2005 e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 21 fev.2014.

_____. **Roteiro para projeto de encerramento e recuperação de lixões**. CETESB, São Paulo, 2014b. Disponível em: <<http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/unificado/roteiros/ATERRO/projeto%20de%20recupera%C3%A7%C3%A3o%20lixao.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2014.

COELHO, M.G.; LIMA, S.C.; MARAGNO, A.N.F.; ALBUQUERQUE, Y.T.; LEMOS, J.C.; SANTOS, C.L.; BRANDÃO, S.L. Contaminação das águas do lençol freático por disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos em Uberlândia-MG/Brasil. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., 2002, Cancun. **Anais...**Cancun, 2002.

CHEN, P.H. Assessment of leachates from sanitary landfills: impact of age, rainfall, and treatment. **Environment International**, v. 22, n. 2, p. 225-237, 1996.

CHIOU, C.T.; MALCOLM, R.L.; BRINTON, T.I; KILE, D.E. Water solubility enhancement of some organic pollutants and pesticides by dissolved humic and fulvic acids. **Environ. Sci. Technol.** v.20. p.502-507, 1986.

CHRISTENSEN, J.B.; JENSEN, D.L.; GRON, C.; FILIP, Z.; CHRISTENSEN, T.H. Characterization of the dissolved organic carbon in landfill leachate-polluted groundwater. **Wat. Res.** V.32. n.1. p. 125-135. 1998.

CHRISTENSEN, T.; KJELDSEN, P.; JENSEN, D.; ET AL. Biogeochemistry of landfill leachate plumes: review. **Applied Geochemistry**, v. 16, n. 7-8, p. 659-718, 2001.

CHRISTENSON, S. C.; COZZARELLI, I. M. U.S. The Norman Landfill Environmental Research Site: **What Happens to the Waste in Landfills?** USGS: Oklahoma, 2003.

CLÉMENT, B. AND MERLIN, G., The contribution of ammonia and alkalinity to landfill leachate toxicity to duckweed. **Sci. Total Environ.**, 70, 71, 1995.

COTTA, J.A.O.; SALAMI, F.H.; MARQUES, A.R.; REZENDE, M.O.O.; LANDGRAF, M. D. Validação do método para determinação de Nitrogênio Kjeldahl Total. **Revista Analytica**, v. 26, n. 1, p. 8, 2007.

9. Referências Bibliográficas

- DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. Porto Alegre: Artmed Bookman, 2006. 608p.
- DURMUSOGLU, E.; YILMAZ, C. Evaluation and temporal variation of raw and pre- treated leachate quality from an active solid waste landfill. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 171, p. 359-382, 2006.
- EHRIG, H.J. Quality and quantity of sanitary landfill leachate. **Waste Management & Research**, v. 1, n. 1, p. 53-68, 1983.
- EHRIG, H.J., **Leachate quality in Sanitary Landfilling: Process, Technology, and Environment Impact**. In: Christensen, T.H., Cossu, R., Stegman, R., (Eds.), Academic Press, New York, 1989.
- EL-FADEL, M.; BOU-ZEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. **Waste Management**, v. 22, p. 269-282, 2002.
- EMBRAPA. **Dados meteorológicos de São Carlos/SP - Unidade Fazenda Canchim**. EMBRAPA, São Carlos, 2014. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/pecuaria-sudeste>>. Acesso em: 28 maio 2014.
- EMCDDA - European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. **Legal topic overviews: classification of controlled drugs**. EMCDDA, Lisboa, Portugal, 2014. Disponível em: < <http://www.emcdda.europa.eu/html.cfm/index146601EN.html>>. Acesso em: 22 junho 2014.
- ERSKINE, A. Transport of ammonium in aquifers: retardation and degradation. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 33, p. 161-170, 2000.
- EZAKI, S. **Íons de metais pesados (Pb, Cu, Cr e Ni) associados a solos de cobertura de resíduos sólidos em dois aterros sanitários da região metropolitana de São Paulo - SP**. 123p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- FANNIN, C. A.; ROBERTS, R. D. Mature land II waste geochemical characteristics and implications for long-term secondary substance release. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 6, p. 369-377, 2006
- FARQUAR, G. J. Leachate: production and characterization. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v.16, p.317-325, 1989.
- FARQUHAR, G.J.; ROVERS, F.A. Gas production during refuse decomposition. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 2, n. 4, p. 483-495, 1973.
- FATTA, D.; PAPADOPOULOS, A.; LOIZIDOU, M. A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area. **Environmental Geochemistry and Health**, v.21, p.175-190, 1999.
- FETTER, C.W. **Containment hydrogeology**. 2ªed. Illinois: Waveland Press, Inc., 1999. 500p.
- FLECK, E. **Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 176 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FRASCÁ, M.H.B.O.; SARTORI, P.L.P. Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. Cap. 2.

FREITAS, A.L.S. **Caracterização do aquífero Botucatu na região do Lixão de São Carlos-SP**. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

GADOTTI, R.F. **Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos**. 150p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

GARCÍA, E. S.; CARDONA-GALLO, S. A. Nitrogen removal from landfill leachate using a sequential biological passive system. **Medellin**, n.178, p. 37-43, 2013.

GOMES, L. P. **Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário**. 167p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

GONÇALVES, A.R.L. **Geologia ambiental da área de São Carlos**. 138p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

HARMSSEN, J. Identification of organic compounds in leachate from a waste tip. **Water Res.**, v.17, p.699, 1983.

HEAD, K. H. Manual of Soil Laboratory Testing. **Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests**. 2nd ed. Toronto: Inc. New York, 1994.

HEAVEY, M. Low-cost treatment of landfill leachate using peat. **Waste Management**, v. 23, p. 447-454, 2003.

HEM, J.D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3.ed. Dallas: USGS, 1985. 272 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 397p.

_____. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 219p.

IDE, A. H.; CARDOSO, F. D.; SANTOS, M.M.; KRAMER, R.D.; AZEVEDO, J.C.R.; MIZUKAWA, A. Utilização da cafeína como indicador de contaminação por esgotos domésticos na bacia do Alto Iguaçu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18, n.2, p. 201-211, 2013.

JOHANNESSEN L.M., BOYER G. **Observations of solid waste landfills in developing countries: Africa, Asia and Latin America**. Urban Waste Management Thematic Group. Waste Management Anchor Team. First ed. The World Bank. Washington, DC., 1999.

KAMATA, R.; SHIRAIISHI, F.; NAKAJIMA, D.; KAGEYAMA, S. Estrogenic effects of leachates from industrial waste landfills measured by a recombinant yeast assay and transcriptional analysis in Japanese Medaka. **Aquatic toxicology** (Amsterdam, Netherlands), v. 101, n. 2, p. 430-7, 2011.

9. Referências Bibliográficas

- KEHEW, A. E. **Applied chemical hydrogeology**. 1st ed., Prentice-Hall: Upper Saddle River, 2001.
- KJELDSSEN; CHRISTENSEN, 1999? KJELDSSEN, P.; CHRISTOPHERSEN, M. (2001). Composition of leachate from old landfills in Denmark. **Waste Manage Res**, v.19, p.249-256.
- KJELDSSEN, P.; BARLAZ, M.A.; ROOKER, A.P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T.H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.
- KOERNER, R. M., SOONG, T. Y. Leachate in landfills: the stability issues. **Geotextiles and Geomembranes**, v.18, p. 293-309, 2000.
- KYLEFORS, K.; ECKE, H.; LAGERKVIST, A. Accuracy of COD test for landfill leachates. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 146, n. 1-4, p. 153-169, 2003.
- LANGRAF, MD; MESSIAS, RA.; REZENDE, MOO. A importância ambiental da vermicompostagem: vantagens e aplicações. **Rima**, São Carlos, 2005.
- LANER, D.; CREST, M.; SCHARFF, H.; MORRIS, J.W.F.; BARLAZ, M.A. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. **Waste Management**, v.32, p.498-512, 2012.
- LEE, A. H.; NIKRAZ, H. BOD:COD Ratio as an indicator for pollutants leaching from landfill. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 263–266, 2014.
- LEITE, W.C.A. **Estudo do comportamento da temperatura, pH e teor de umidade na decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. 180p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- LEPSCH, I.F. Formação e conservação dos solos. 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178 p.
- LI, R.; YUE, D.; LIU, J.; NIE, Y. Size fractionation of organic matter and heavy metals in raw and treated leachate. **Waste management** (New York, N.Y.), v. 29, n. 9, p. 2527-33, 2009.
- LIMA, L.M.Q. **Estudo comparativo da recirculação de chorume na aceleração da metanogênese em aterro sanitário**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1988.
- LIN, A. Y.; LIN, C.; TUNG, H.; CHARY, N.S. Potential for biodegradation and sorption of acetaminophen, caffeine, propranolol and acebutolol in lab-scale aqueous environments. **Journal of Hazardous Materials**, n. 183, p. 242-250, 2010.
- LIU, C.; ZHANG, Y.; ZHANG, F.E.; ZHANG, S.; YIN, M.; YE, H.; HOU, H.; DONG, H.; ZHANG, M.; JIANG, J.; PEI, L. Assessing pollutions of soil and plant by municipal waste dump. **Environ Geol**, v.52, p.641-651, 2007.
- LOPES, A.A. **Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13)**. 394p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

LUDVIGSEN, L.; ALBRECHTSEN, H.J.; RINGELBERG, D.B.; EKELUND, F.; CHRISTENSEN, T.H. Distribution and composition of microbial populations in a landfill leachate contaminated aquifer (Grindsted, Denmark). **Microb Ecol**, v.37, p.197–207, 1999.

MATSUZAKI, S.S. **Aplicação de modelo computacional de escoamento de águasubterrânea no lixão de São Carlos**. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

McBEAN, E.A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. **Solid waste landfill engineering and design**. Englewood Cliffs, New Jersey, EUA: Prentice-Hall PTR, 1995. 521p.

MENEZES, D.B. **Diagnóstico dos impactos do lixão de São Carlos (SP) no meio físico**. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

MERBACH JUNIOR, P.S. **Estudos de avaliação de metais pesados em percolado de aterro sanitário em função do tempo de disposição**. 83p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Plano Nacional de Saneamento Básico 2013**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, 2013.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 mar 2004.

_____. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 dez 2011. Seção 1.

MORAES, P.B. **Tratamento de chorume de aterro sanitário usando eletrólise foto-assistida**. 118 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

NASCIMENTO FILHO, I.; MÜHLEN, C.; CARAMÃO, E.B. Estudo de compostos orgânicos em lixiviado de aterros sanitários por EFS e CG/EM. **Química Nova**, v. 24, n. 4, p. 554-556, 2001.

NICHOLSON, R.; CHERRY, J.; REARDON, E. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study 6. Hydrogeochemistry. **Journal of Hydrology**, v. 63, n. 1-2, p. 131-176, 1983.

NÖDLER K., LICH T., BESTER K., SAUTER M. Development of a multi-residue analytical method based on liquid chromatography-tandem mass spectrometry, for the simultaneous determination of 46 micro-contaminants in aqueous samples. **J. Chromatogr.**, v.1217. p.6511-6521, 2010.

OLIVEIRA, S.; PASQUAL, A. Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário. **Eng Sanit Ambient**, v.9, n.3, p. 240-249, 2004.

OMAN, C.B.; JUNESTEDT, C. Chemical characterization of landfill leachates - 400 parameters and compounds. **Waste Manag**, v.28, p.1876-1891, 2008.

PANAGOULIAS, T. I.; SILVA FILHO, E.V. Estudo hidrogeoquímico do flúor nas águas subterrâneas das bacias dos rios Casseribú, Macacú e São João, estado do Rio de Janeiro.

9. Referências Bibliográficas

In: SILVA, C.R., FIGUEIREDO, B.R., CAPITANI, E.M., CUNHA, F. G. (Org.). **Geologia Médica no Brasil**. Efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente. Rio de Janeiro: CPRM, v. 1, p. 126-129, 2006.

PEDERSEN, O.; COLMER, T.D.; SAND-JENSEN, K. Underwater photosynthesis of submerged plants - recent advances and methods. **Front. Plant.Sci.**, v.4, p. 140, 2013.

PIAI, K. A., FERREIRA, P. C., TREVILATO, T. M. B., SEGURA-MUÑOZ, S. I. Análise dos níveis de metais em água subterrânea coletada à montante e jusante do aterro sanitário de Ribeirão Preto, Brasil. **Águas Subterrâneas**, v.20, n.1, p.131-138, 2006.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. Aterro sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, São Carlos. 2009. 92p.

_____. Investigação detalhada e avaliação de risco da área antigo lixão Fazenda Santa Madalena. 2º relatório bimestral. Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano - SMH DU. São Carlos, 2010. 114p.

_____. Investigação ambiental detalhada (Relatório final). Coordenadoria Municipal de Meio Ambiente, São Carlos, 2011.390p.

POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills**. Cincinnati, USEPA, Office of Research and Development. EPA/600/2-86/073. 1985.

PRECHTHAI, T.; PARKPIAN, P.; VISVANATHAN, C. Assessment of heavy metal contamination and its mobilization from municipal solid waste open dumping site. **J. Hazard.Mat.**, v.156, n.1-3, p.86-94, 2008.

QASIN, S.R.; CHIANG, W. Sanitary Landfill Leachate: Generation, Control and Treatment. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C. 1994. 339p.

REES, J.F. The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter. **J. Chem. Technol. Biot.**, v.30, p.161-175, 1980.

REICHERT, G.A. **A vermicompostagem aplicada ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. 136 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

REINHART, D.R.; GROSH, C.J. **Analysis of Florida MSW landfill leachate quality**. Florida Center for Solid and Hazardous Management, Gainesville, FL, 1998.

RIOS, L. **Estudo limnológico e fatores ecológicos em ribeirões e córregos da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão (Estado de São Paulo)**. 146p. Dissertação(Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

ROLING, W. F.; VAN-BREUKELN, B. M.; BRASTER, M.; LIN, B.; VAN-VERSEVELD, H. W. Relationships between Microbial Community Structure and Hydrochemistry in a Landfill Leachate-Polluted Aquifer. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 67, n. 10, p. 4619-4629, 2001.

ROSQVIST, H., DESTOUNI, G. Solute transport through preferential pathways in municipal solid waste. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.46, p.39-60, 2000.

SANPHOTI, N.; TOWPRAYOON, S.; CHAIPRASERT, P.; NOPHARATANA, A. The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. **J. Environ. Manage.**, v. 81, n. 1, p. 27–35, 2006.

SÃO CARLOS. Lei nº 13.944, de 12 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município - APREM e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, São Carlos, SP, 13 dez 2006.

SÃO PAULO. Decreto Estadual nº 8.468, de 08 de setembro de 1976. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 1976.

_____. Decreto nº 10.755, de 22 de novembro de 1977. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 1977.

_____. Decreto Estadual nº 20.906, de 08 de junho de 1983. Declara área de proteção ambiental a regiões situadas em diversos municípios, dentre os quais Corumbataí, Botucatu e Tejuapá. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 1983.

_____. Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2006.

_____. Decreto nº 54.645, de 05 de agosto de 2009. Regulamenta dispositivos da Lei nº 12.300 de 16 de março de 2006, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e altera o inciso I do artigo 74 do Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2009a.

_____. Lei nº 13.577, de 08 de julho de 2009. Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá outras providências correlatas. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2009b.

_____. Decreto nº 57.071, de 20 de junho de 2011. Altera a redação do “caput” do artigo 27 do Decreto nº 54.645, de 5 de agosto de 2009, que regulamenta dispositivos da Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2011.

_____. Decreto nº 57.817, de 05 de junho de 2012. Institui a Estratégia para o Desenvolvimento Sustentável do Estado de São Paulo 2020, e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2012a.

_____. Resolução SMA nº 38, de 30 de abril de 2014. Dispõe sobre a alteração na designação de integrante da Unidade de Execução do Programa – UEP/Meio Ambiente, do Programa “Recuperação Socioambiental da Serra do Mar e Sistema de Mosaicos da Mata Atlântica”. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 01 mai. 2012b. Seção 1. p.52-53.

_____. Decreto nº 59.263, de 05 de junho de 2013. Regulamenta a Lei nº 13.577, de 8 de julho de 2009, que dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas, e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, SP, 2013.

SCHALCH, V. **Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano**. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1984.

9. Referências Bibliográficas

SCHALCH, V. **Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia**. 220p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

SINGH, U.K.; KUMAR, M.; CHAUHAN, R.; JHA, P.K.; RAMANATHAN, A.; SUBRAMANIAN, V. Assessment of the impact of landfill on groundwater quality: A case study of the Pirana site in western India. **Environ Monit Assess**, v.141, p.309–321, 2008.

SINGH, R. K., DATTA, M., NEMA, A. K. A new system for groundwater contamination hazard rating of landfills. **J. Environ. Manage.**, v.91, p.344-357, 2009.

SISINNO, C. L. S., MOREIRA, J. C. Evaluation of environmental contamination and pollution in an area influenced by a landfill at Morro do Céu, Niterói, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v.12, p.515-523, 1996.

SOUTO, G.D.B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”)**. 371p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SOUTO, G.D.B.; POVINELLI, J. Tabelas de características típicas do lixiviado de aterros sanitários brasileiros: fases ácida e metanogênica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26. **Anais...** Porto Alegre, 2011.

TEIXEIRA, D. **Caracterização limnológica dos sistemas lóticos e variação temporal e espacial de invertebrados bentônicos na bacia do Ribeirão do Feijão (São Carlos - SP)**. 193p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

VARNIER, C. L. **Avaliação da contaminação de uma fossa negra desativada na zona não-saturada do aquífero Adamantina em Urânia (SP)**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos - SP, com auxílio da geofísica**. 177p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

VILAS BÔAS, D.M.F. **Estudo da microbiota anaeróbia hidrolítica-fermentativa em aterro sanitário**. 157p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

WENDLAND, E., BARRETO, C., GOMES, L.H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **J. Hydrol.** v.342, p.261- 269, 2007.

ZUQUETTE, L. Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

APÊNDICE A – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA OS RESULTADOS DE QUALIDADE DOS RESÍDUOS ATERRADOS

	pH	PO ₄	DQO	Zn	Pb	Cd	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr	Ag	Co	Sr	Ba	Al	Ca	Mg	Na	K
pH	1																			
PO ₄	0,24	1																		
DQO	0,37	0,70	1												[0,70 a 0,89]	Correlação forte				
Zn	0,25	0,53	0,61	1											[0,90 a 1,00]	Correlação muito forte				
Pb	0,28	0,66	0,77	0,82	1															
Cd	0,31	-0,05	0,21	0,12	0,23	1														
Ni	0,49	0,30	0,34	0,62	0,61	0,22	1													
Fe	0,23	-0,04	0,04	-0,30	-0,18	0,35	-0,09	1												
Mn	0,04	-0,13	-0,16	-0,32	-0,09	0,34	0,38	0,06	1											
Cu	0,17	0,45	0,66	0,91	0,74	-0,02	0,47	-0,46	-0,40	1										
Cr	0,33	0,28	0,46	0,57	0,48	0,32	0,51	0,11	-0,01	0,37	1									
Ag	-0,17	-0,05	0,01	-0,18	-0,04	0,26	0,22	-0,09	0,67	-0,08	0,06	1								
Co	0,26	0,79	0,68	0,65	0,77	0,41	0,35	0,06	-0,10	0,48	0,52	0,04	1							
Sr	0,27	-0,20	-0,02	-0,36	-0,02	0,30	0,36	0,15	0,74	-0,31	-0,09	0,54	-0,25	1						
Ba	0,24	-0,03	0,01	0,06	0,21	0,56	0,29	-0,09	0,31	0,09	0,05	0,49	0,23	0,52	1					
Al	-0,76	0,06	-0,22	0,09	-0,11	-0,65	-0,31	-0,46	-0,37	0,19	-0,27	-0,01	-0,10	-0,60	-0,42	1				
Ca	0,13	-0,20	-0,11	-0,31	0,01	0,18	0,34	0,00	0,61	-0,25	-0,09	0,50	-0,25	0,93	0,59	-0,42	1			
Mg	0,02	-0,03	-0,15	0,37	0,22	0,15	0,08	0,03	-0,31	0,28	-0,21	-0,34	0,15	-0,32	0,17	0,09	-0,27	1		
Na	-0,58	0,35	0,32	0,17	0,31	0,03	-0,11	0,14	0,04	0,09	0,01	0,03	0,35	-0,25	-0,37	0,38	-0,30	0,01	1	
K	-0,53	0,41	0,36	0,12	0,29	0,09	-0,10	0,13	0,14	0,07	-0,03	0,16	0,36	-0,13	-0,24	0,30	-0,21	-0,07	0,97	1

APÊNDICE B – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA OS RESULTADOS DE QUALIDADE DO CHORUME IMÓVEL

	pH	Alc	CE	DQO	DBO	COD	PO ₄	NTK	NAT	NO ₃	NO ₂	Zn	Pb	Cd	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr	Ag	Co	Sr	Ba	Al	Ca	Mg	Na	K
pH	1,00																											
Alc	0,70	1,00																										
ce	0,96	0,62	1,00																									
DQO	0,19	0,08	0,29	1,00																								
DBO	0,55	0,36	0,61	0,85	1,00																							
COD	0,80	0,63	0,86	0,32	0,53	1,00																						
PO ₄	0,34	0,21	0,38	0,35	0,27	0,63	1,00																					
NTK	0,75	0,27	0,77	0,19	0,49	0,64	0,41	1,00																				
NAT	0,81	0,45	0,89	0,08	0,45	0,71	0,35	0,81	1,00																			
NO ₃	-0,50	-0,28	-0,48	-0,28	-0,44	-0,41	-0,09	-0,26	-0,32	1,00																		
NO ₂	0,59	0,35	0,74	0,49	0,57	0,75	0,54	0,55	0,71	-0,24	1,00																	
Zn	0,14	0,07	0,17	0,31	0,04	0,29	0,59	-0,04	0,04	-0,14	0,25	1,00																
Pb	0,05	-0,04	0,10	0,21	-0,05	0,18	0,59	0,05	0,12	0,00	0,26	0,93	1,00															
Cd	0,35	0,15	0,44	0,36	0,19	0,49	0,45	0,22	0,31	-0,37	0,45	0,87	0,81	1,00														
Ni	0,25	0,45	0,23	-0,03	-0,13	0,27	0,21	-0,02	0,18	0,11	0,35	0,52	0,54	0,52	1,00													
Fe	0,25	0,10	0,43	0,45	0,40	0,36	0,07	0,37	0,42	0,09	0,43	0,28	0,31	0,55	0,26	1,00												
Mn	0,25	0,07	0,47	0,09	0,05	0,47	0,10	0,30	0,50	-0,19	0,55	0,23	0,25	0,58	0,18	0,66	1,00											
Cu	0,09	0,16	0,18	0,20	0,01	0,26	0,08	-0,07	0,07	0,02	0,30	0,59	0,55	0,72	0,71	0,59	0,47	1,00										
Cr	-0,28	-0,15	-0,19	0,39	0,08	-0,01	0,04	-0,21	-0,29	-0,21	-0,03	0,49	0,43	0,58	0,19	0,39	0,29	0,46	1,00									
Ag	0,05	-0,03	0,11	0,31	0,03	0,20	0,20	-0,16	-0,15	-0,08	0,21	0,77	0,63	0,79	0,46	0,38	0,37	0,80	0,48	1,00								
Co	0,37	0,14	0,55	0,47	0,48	0,42	0,05	0,38	0,50	-0,17	0,54	0,37	0,37	0,68	0,28	0,90	0,71	0,68	0,39	0,53	1,00							
Sr	-0,06	-0,04	0,05	0,17	-0,17	0,27	0,59	-0,04	0,04	-0,11	0,29	0,82	0,82	0,77	0,37	0,27	0,51	0,44	0,58	0,57	0,28	1,00						
Ba	-0,44	-0,29	-0,36	0,32	-0,17	-0,15	0,19	-0,40	-0,44	-0,04	-0,09	0,69	0,65	0,61	0,23	0,27	0,51	0,44	0,58	0,57	0,28	0,28	1,00					
Al	0,42	0,22	0,60	0,15	0,19	0,40	-0,06	0,39	0,65	-0,18	0,60	0,19	0,26	0,56	0,43	0,76	0,84	0,58	0,18	0,31	0,83	0,27	0,10	1,00				
Ca	0,12	0,03	0,23	0,19	-0,08	0,39	0,62	0,12	0,22	-0,12	0,41	0,86	0,88	0,87	0,47	0,40	0,59	0,54	0,53	0,63	0,44	0,97	0,69	0,43	1,00			
Mg	0,14	0,02	0,27	-0,25	-0,32	0,33	0,11	0,12	0,31	-0,23	0,34	0,02	0,00	0,21	-0,01	0,06	0,74	0,00	-0,02	0,06	0,08	0,44	0,08	0,43	0,41	1,00		
Na	0,92	0,69	0,98	0,26	0,56	0,89	0,41	0,70	0,88	-0,39	0,79	0,17	0,11	0,42	0,32	0,43	0,51	0,25	-0,22	0,12	0,54	0,09	-0,34	0,62	0,26	0,32	1,00	
K	0,90	0,64	0,95	0,30	0,56	0,90	0,55	0,68	0,83	-0,37	0,81	0,37	0,30	0,55	0,37	0,40	0,47	0,28	-0,14	0,26	0,54	0,24	-0,23	0,55	0,41	0,27	0,96	1,00

[0,70 a 0,89] Correlação forte
[0,90 a 1,00] Correlação muito forte

APÊNDICE C – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA OS RESULTADOS DE QUALIDADE DO LIXIVIADO

	pH	CE	Alc	DQO	DBO	NTK	NAT	COD	SiO ₂	Cl	PO ₄	NO ₃	NO ₂	F	Eh	Zn	Pb	Cd	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr	Ag	Mg	Co	Ba	Al	Ca	Na	K	Sr
pH	1																															
CE	0,72	1																														
Alc	0,68	0,87	1																													
DQO	0,59	0,84	0,81	1																												
DBO	0,55	0,82	0,81	0,89	1																											
NTK	0,72	0,93	0,91	0,88	0,82	1																										
NAT	0,73	0,92	0,91	0,91	0,82	0,99	1																									
COD	0,71	0,95	0,90	0,90	0,82	0,95	0,97	1																								
SiO ₂	0,15	0,02	0,10	-0,03	-0,08	0,13	0,08	0,06	1																							
Cl	0,68	0,88	0,79	0,91	0,78	0,92	0,94	0,94	-0,02	1																						
PO ₄	0,40	0,64	0,52	0,76	0,68	0,56	0,59	0,64	-0,06	0,66	1																					
NO ₃	0,46	0,66	0,64	0,70	0,58	0,66	0,68	0,75	-0,36	0,71	0,46	1																				
NO ₂	-0,26	-0,19	-0,28	-0,10	-0,01	-0,22	-0,21	-0,24	-0,16	-0,16	-0,01	-0,12	1																			
F	0,29	0,48	0,53	0,36	0,43	0,48	0,47	0,43	-0,16	0,37	0,14	0,45	-0,24	1																		
Eh	0,62	0,49	0,49	0,42	0,40	0,52	0,54	0,47	0,09	0,50	0,39	0,31	-0,20	0,16	1																	
Zn	0,06	0,29	0,26	0,37	0,24	0,29	0,34	0,38	-0,40	0,37	0,23	0,74	-0,16	0,32	0,15	1																
Pb	-0,02	-0,14	-0,14	-0,14	-0,17	-0,17	-0,15	-0,15	0,33	-0,17	0,04	-0,31	0,15	-0,14	0,04	-0,21	1															
Cd	0,14	0,17	0,31	0,25	0,29	0,15	0,19	0,21	-0,29	0,12	0,16	0,38	-0,16	0,07	-0,22	0,31	-0,38	1														
Ni	0,03	-0,13	-0,12	-0,09	-0,09	-0,14	-0,12	-0,12	-0,25	-0,08	0,00	-0,07	0,07	0,07	0,30	0,02	0,25	-0,17	1													
Fe	-0,58	-0,63	-0,62	-0,56	-0,53	-0,66	-0,66	-0,65	-0,17	-0,58	-0,35	-0,45	0,10	-0,23	-0,56	-0,10	-0,09	0,12	0,20	1												
Mn	-0,72	-0,73	-0,69	-0,62	-0,56	-0,77	-0,76	-0,75	-0,20	-0,68	-0,39	-0,53	0,23	-0,43	-0,49	-0,14	0,02	0,14	0,08	0,78	1											
Cu	0,30	0,30	0,23	0,41	0,12	0,30	0,35	0,33	0,01	0,39	0,31	0,24	0,14	-0,03	0,30	0,18	0,15	0,05	0,02	-0,19	-0,22	1										
Cr	0,30	0,05	-0,01	0,02	-0,05	0,05	0,09	0,07	-0,19	0,12	0,00	0,12	0,00	0,22	0,35	0,20	0,03	-0,18	0,76	0,10	-0,10	0,10	1									
Ag	-0,36	-0,02	0,12	0,05	0,10	0,01	0,00	-0,03	-0,26	-0,03	-0,01	0,05	-0,13	0,22	-0,22	0,18	-0,05	0,31	-0,06	0,16	0,35	-0,08	-0,18	1								
Mg	0,43	0,45	0,46	0,36	0,26	0,50	0,45	0,48	0,19	0,41	0,17	0,29	-0,29	0,21	0,10	0,01	-0,06	0,12	-0,21	-0,37	-0,52	0,20	0,08	-0,13	1							
Co	0,61	0,73	0,67	0,81	0,71	0,81	0,83	0,76	-0,14	0,87	0,54	0,57	-0,16	0,38	0,37	0,25	-0,15	0,17	-0,09	-0,42	-0,50	0,43	0,12	0,14	0,30	1						
Ba	-0,14	-0,12	-0,26	-0,03	-0,10	-0,04	-0,06	-0,09	-0,12	0,02	-0,01	-0,03	0,06	-0,12	-0,20	0,09	0,09	-0,03	-0,01	0,34	0,12	0,01	-0,04	0,07	-0,04	0,25	1					
Al	0,05	0,15	0,17	0,28	0,15	0,16	0,20	0,27	-0,33	0,21	0,16	0,60	-0,13	0,12	-0,07	0,71	-0,21	0,61	0,00	0,11	0,00	0,23	0,04	0,16	0,12	0,19	0,42	1				
Ca	-0,59	-0,61	-0,59	-0,55	-0,53	-0,63	-0,63	-0,61	-0,13	-0,57	-0,36	-0,43	0,07	-0,26	-0,58	-0,09	-0,11	0,20	0,12	0,93	0,75	-0,16	0,03	0,18	-0,25	-0,38	0,39	0,19	1			
Na	0,74	0,93	0,86	0,83	0,77	0,93	0,93	0,93	-0,04	0,93	0,58	0,71	-0,30	0,47	0,51	0,32	-0,23	0,15	-0,10	-0,59	-0,69	0,27	0,12	0,02	0,42	0,85	-0,04	0,15	-0,58	1		
K	0,72	0,90	0,84	0,82	0,75	0,92	0,92	0,91	-0,02	0,92	0,56	0,69	-0,32	0,45	0,49	0,31	-0,24	0,11	-0,11	-0,57	-0,69	0,28	0,12	0,01	0,42	0,84	-0,04	0,12	-0,56	0,99	1	
Sr	-0,68	-0,68	-0,61	-0,62	-0,54	-0,73	-0,72	-0,69	0,01	-0,67	-0,41	-0,51	0,18	-0,28	-0,65	-0,25	-0,04	0,15	-0,10	0,79	0,80	-0,22	-0,22	0,26	-0,37	-0,52	0,14	-0,06	0,82	-0,67	-0,65	1

[0,70 a 0,89] Correlação forte
[0,90 a 1,00] Correlação muito forte

APÊNDICE D – DETALHES SOBRE AS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO LIXIVIADO

Parâmetro	Diluição	Amostra bruta ou diluída	Branco	Curva	Reagentes	Equipamento	Interferência da cor?	Indicativo cor	Descarte
Cl⁻	1:1	25 ml	25 ml água	0 a 20,0 mg/l	1º Tiocionato de Hg (2ml) 2º Íon Férrico (1ml)	Hach	sim	Laranja forte = maior concentração de cloreto	Galão cloreto
F⁻	1:2	25 ml	25 ml água	0 a 2,0 mg/l	1º Solução de HCl + ácido hidrolórico (5ml)	Hach	sim	Groselha forte = maior concentração de fluoreto	Galão fluoreto
SO₄⁻²	1:1	25 ml	25 ml própria amostra	0 a 70,0 mg/l	1º sachê sulfaver-sulfate	Hach	sim	Turbidez forte = concentração de sulfato	Galão sulfato
SiO₂	1:1	25 ml	25 ml própria amostra	0 a 100 mg/l	1º sachê molibdato 2º sachê ácido 3º sachê HNO ₃	Hach	sim	Esverdeado forte = maior concentração de sílica	Pia
NO₂⁻/NO₃⁻	-	100 ml	flocular		1º suspensão Al(OH) ₃ (3ml)	Filtrar 1,02 µm	sim	Obter mínimo 80 ml amostra floculada	Pia
NO₂⁻	1:2	25 ml flocular	25 ml própria amostra floculada	0 a 0,3 mg/l	1º sachê nitriver-nitrite	Hach	sim	Rosa forte = maior concentração de nitrito	Pia
NO₃⁻	1:5	25 ml flocular	25 ml água	Abs1: 0 a 2,0	1º solução HCl p/ NO ₃ (0,5ml)	Shimadzu	sim	Usa Abs2 se Abs2 = 10% Abs1	Pia
PO₄⁻³	1:10	30 ml	25 ml água	0 a 2,0 mg/l	1º persulfato K (3ml) 2º indicador misto (3ml)	Shimadzu	sim	Azul forte = maior concentração de fosfato	Pia
DQO	1:1	2 ml	2 ml água	20 a 800 mg/l	1º Bicromato de K (1,5ml) 2º H ₂ SO ₄ (3,5ml)	Digestor Leitura Hach	não	Se ficar verde estourou	Galão DQO

Parâmetro	Diluição	Vol. amostra	Branco	Reagentes	Equipamento	Interferência da cor?	Observação	Descarte
DBO	1:1	12 a 50 ml	Água nutrientes	-	Estufa DBO e Oxímetro	não	Tem que ser menor DQO	Pia
COD	1:1	15 ml	15 ml água	-	Analizador de carbono	não		Pia
NH4	1:10	100 ml	100 ml água ~ ác 3,08 ml	1º NaOH (2ml) 2º Fenolftaleína (4 gotas) ----- Erlenmeyer 1º Ác Bórico (100ml) 2º indicador preto (6 gotas) ----- 1º H ₂ SO ₄	1 Destillation 2 Titulador	Quando estiver colocando reagentes, se não ficar rosa, colocar mais NaOH	Verde - Azul - Roxo - Fumê - virada Laranja	Pia
NTK	1:5	25 ml	25 ml água ~ ác 0,07 ml	1º Catalisador azul (10g) 2º H ₂ SO ₄ (25ml) ----- Erlenmeyer 1º Ác Bórico (100ml) 2º indicador preto (6 gotas) ----- 1º H ₂ SO ₄	1 Scrubber 2 Digestion 3 Destillation 4 Titulador	Início destilação verificar se fica escuro, se não ficar, adicionar mais NaOH	Verde - Azul - Roxo - Fumê - virada Laranja	Pia
Metais	1:1	50 ml	50 ml água <i>*fazer em dia separado</i>	1º HNO ₃ (6ml) 2º HNO ₃ (10ml) 3º HCl (5ml) + H ₂ O (7,5ml)	1 Digestor 2 Spectrofotômetro	1ª vez reduzir p/ 10 a 20 ml 2ª vez reduzir p/ 10 a 20 ml 3ª vez 15 min1ª vez reduzir p/ 10 a 20 ml 2ª vez reduzir p/ 10 a 20 ml 3ª vez 15 min		Pia
1 pH					1) phmetro			
2 Condutividade	1:1	50 ml	Não tem	3) H ₂ SO ₄	2) condutivímetro	não		Pia
3 Alcalinidade					3) phmetro /titulador			

APÊNDICE E – RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Resultados das amostras de lixiviado filtrado a 0,45 µm (coletado nos lisímetros de sucção L1, L2, L3, L4, L5, L6) e dos extratos de solubilização correspondentes as profundidades aproximadas de coleta das amostras sólidas do maciço do lixão

Profundidade (m)	Dez 2012	Jan 2013	Mar 2013	Mai 2013	Jul 2013	Set 2013	Jan 2014	Maciço
				pH				
L1 (0,8)	7,0	6,4	6,9	7,2	7,0	7,5	7,6	7,9
L2 (1,3)	7,5	6,7	6,9	7,3	6,8	7,4	6,9	8,2
L3 (1,8)	7,9	7,4	7,3	7,8	7,5	7,7	7,8	8,2
L4 (2,3)	8,0	7,8	7,6	8,3	7,8	8,2	7,5	8,1
L5 (2,8)	8,2	8,1	7,5	8,0	7,7	8,1	7,6	8,1
L6 (3,3)	8,1	7,5	7,4	7,8	7,5	8,1	7,4	8,1
				Eh (mV)				
L1 (0,8)	-	-	-	-324	-343	-75	-119	-
L2 (1,3)	-	-	-	-325	-329	-418	-423	-
L3 (1,8)	-	-	-	-360	-330	-237	-207	-
L4 (2,3)	-	-	-	-142	-215	-211	-156	-
L5 (2,8)	-	-	-	-164	-186	-164	-230	-
L6 (3,3)	-	-	-	-235	-198	-170	-214	-
				Temperatura (°C)				
Ambiente	28	26	26	21	17	23	30	16
L1 (0,8)	27	26	25	23	21	25	30	16
L2 (1,3)	27	26	25	23	21	24	28	20
L3 (1,8)	26	26	25	23	22	23	27	20
L4 (2,3)	25	25	25	23	22	23	27	20
L5 (2,8)	25	25	25	23	22	22	26	21
L6 (3,3)	25	25	25	22	20	22	26	21
				Condutividade elétrica (µS.cm⁻¹)				
L1 (0,8)	1037	1105	1044	1064	1009	1041	1282	
L2 (1,3)	1911	1139	1271	1117	960	1242	1823	
L3 (1,8)	5242	3970	3910	3900	4060	4270	4550	
L4 (2,3)	6432	7470	8000	7890	7240	6930	6460	
L5 (2,8)	8376	9080	7220	7660	8160	8040	8610	
L6 (3,3)	6103	4430	7090	1220	7340	5870	6060	

Profundidade (m)	Dez 2012	Jan 2013	Mar 2013	Mai 2013	Jul 2013	Set 2013	Jan 2014	Maciço
				NTK (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	53	91	108	112	102	76	113	
L2 (1,3)	158	97	120	76	108	120	161	
L3 (1,8)	484	325	391	299	385	403	603	
L4 (2,3)	620	744	771	690	680	674	644	
L5 (2,8)	533	843	710	666	789	803	712	
L6 (3,3)	546	399	686	624	740	582	562	
				NH4 (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	37	30	68	49	42	59	85	
L2 (1,3)	120	40	92	55	54	75	102	
L3 (1,8)	453	252	311	181	253	371	364	
L4 (2,3)	573	618	669	284	677	651	544	
L5 (2,8)	644	742	627	657	765	715	640	
L6 (3,3)	487	480	576	603	686	546	456	
				NO2 (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,101	0,005	0,011	0,050	2,032	0,025		0,049
L2 (1,3)	0,007	0,004	0,046	0,020	0,005	0,049	0,006	0
L3 (1,8)	0,004	0,004	0,009	0	0,002	0,007	0,005	0
L4 (2,3)	0,005	0,004	0	0	0,003	0,007	0,005	0
L5 (2,8)	0,001	0,004	0,085	0	0	45,5	0,029	0
L6 (3,3)	0,004	0,005	0,075	0	0,002	0,039	0,004	0
				NO3 (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	15	3	2	2	1	2		0
L2 (1,3)	5	3	3	2	2	2	3	0
L3 (1,8)	13	10	9	7	46	7	8	0
L4 (2,3)	15	24	21	18	73	18	12	0
L5 (2,8)	30	26	24	16	57	41	24	0
L6 (3,3)	17	14	22	15	31	16	13	0
				COD (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	82	154	139	94	124	120	117	
L2 (1,3)	221	139	168	124	140	143	251	
L3 (1,8)	676	483	477	438	489	581	551	
L4 (2,3)	783	841	903	845	1182	798	789	
L5 (2,8)	1122	968	886	825	1064	945	1058	
L6 (3,3)	742	576	831	721	1031	739	729	
				PO4 (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,0	0,4	0,1	0,1	0,0	0,2		0,4
L2 (1,3)	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	1,1
L3 (1,8)	1,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6
L4 (2,3)	0,6	0,6	1,0	1,5	0,7	0,4	0,5	4,5
L5 (2,8)	6,7	2,9	5,9	4,4	4,1	3,6	2,3	9,1
L6 (3,3)	0,7	0,7	0,7	1,0	2,8	0,5	4,1	4,1

Profundidade (m)	Dez 2012	Jan 2013	Mar 2013	Mai 2013	Jul 2013	Set 2013	Jan 2014	Maciço
				F (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,07	0,58	0,52	0,46	0,42	0,64	-	
L2 (1,3)	0	0,48	0,50	0,54	0,46	0,50	0,72	
L3 (1,8)	0,53	0,58	0,58	0,42	0,90	0,73	0,50	
L4 (2,3)	0,55	0,80	0,80	0,64	0,72	0,86	0,66	
L5 (2,8)	0,47	0,92	0,70	0,42	0,98	0,88	0,56	
L6 (3,3)	0,67	1,06	0,66	0,30	0,40	0,60	0,44	
				Cl (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	34	29	11	18	21	32	32	
L2 (1,3)	109	38	21	16	19	23	85	
L3 (1,8)	268	167	138	147	190	208	215	
L4 (2,3)	355	478	425	550	515	490	380	
L5 (2,8)	510	345	485	528	720	730	725	
L6 (3,3)	265	260	443	505	530	458	403	
				Zn (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,038	0,094	-	0	0,237	0,013	0,092	0,081
L2 (1,3)	0,030	0,064	-	0	0,131	0,01	0,005	0,089
L3 (1,8)	0,044	0,051	-	0	0,091	0,001	0,013	0,107
L4 (2,3)	0,078	0,075	-	0,058	1,301	0,003	0,084	0,269
L5 (2,8)	0,044	0,065	-	0,070	1,562	0,175	0,059	0,199
L6 (3,3)	0,084	0,072	-	0,011	0,128	0,018	0,009	0,168
				Pb (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0	0,05	0,07	0	0,04	0,10	-	0,12
L2 (1,3)	0,06	0	0,10	0,06	0	0,11	-	0,07
L3 (1,8)	0,06	0,03	0,19	0,06	0	0	-	0,05
L4 (2,3)	0,04	0,05	0,03	0,04	0,02	0	-	0,20
L5 (2,8)	0,10	0,03	0,07	0,10	0,02	0	-	0,16
L6 (3,3)	0	0,07	0,05	0	0	0,11	-	0,17
				Cd (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,022	0,018	0,009	0,015	0,048	0	0	0,050
L2 (1,3)	0,024	0,016	0,012	0,012	0,027	0,007	0,004	0,050
L3 (1,8)	0,026	0,017	0,010	0,018	0,033	0,008	0	0,050
L4 (2,3)	0,036	0,028	0,011	0,014	0,032	0,013	0	0,050
L5 (2,8)	0,032	0,029	0,017	0,020	0,029	0,02	0	0,040
L6 (3,3)	0,036	0,032	0,018	0,018	0,028	0,009	0,002	0,050
				Ni (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0	0,123	0,051	0,102	0,189	1,647	0,008	0,28
L2 (1,3)	0,022	0,060	0,040	0,053	0,063	0,463	0,032	0,21
L3 (1,8)	0,040	0,056	0,031	0,054	0,057	0,041	0,033	0,22
L4 (2,3)	0,090	0,114	0,114	0,159	0,159	0,05	0,05	0,23
L5 (2,8)	0,156	0,161	0,110	0,168	0,202	0,13	0,129	0,24
L6 (3,3)	0,056	0,085	0,123	0,150	0,158	0,071	0,07	0,29

Profundidade (m)	Dez 2012	Jan 2013	Mar 2013	Mai 2013	Jul 2013	Set 2013	Jan 2014	Maciço
				Mn (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	2,4	4,2	2,4	3,9	5,0	1,6	0	0,3
L2 (1,3)	2,6	3,0	2,1	3,1	1,8	1,8	1,2	0,2
L3 (1,8)	0,3	0,5	0,3	0,5	0,4	0,3	0	0,2
L4 (2,3)	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
L5 (2,8)	0,3	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
L6 (3,3)	0,4	0,5	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
				Cu (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0	0,006	0	0	0	0,017	0	0
L2 (1,3)	0	0	0,001	0	0	0,014	0	0
L3 (1,8)	0	0	0,017	0	0	0,004	0,005	0
L4 (2,3)	0	0	0,001	0	0,008	0,005	0,03	0,270
L5 (2,8)	0	0	0,055	0	0,112	1,379	0,01	0,100
L6 (3,3)	0	0	0,002	0	0,157	0,274	0	0,010
				Cr (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,022	0,019	0,000	0,023	0,057	0,209	0,007	0,03
L2 (1,3)	0,006	0,009	0,000	0,014	0,003	0,093	0,008	0
L3 (1,8)	0,038	0,012	0,011	0,027	0,028	0,112	0,053	0,06
L4 (2,3)	0,028	0,012	0,012	0,030	0,077	0,092	0,043	0,16
L5 (2,8)	0,028	0,028	0,021	0,041	0,081	0,067	0,045	0,07
L6 (3,3)	0,040	0,008	0,009	0,037	0	0,057	0,022	0,15
				Ag (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0	0,020	0,006	0,002	0,009	0	0	0,005
L2 (1,3)	0	0,004	0,006	0,001	0,004	1,001	0,002	0,004
L3 (1,8)	0	0,002	0,004	0,001	0,005	0	0	0,002
L4 (2,3)	0	0,012	0,005	0,001	0,004	0,003	0,002	0,003
L5 (2,8)	0	0,007	0,004	0,006	0,006	0,003	0,002	0,002
L6 (3,3)	0,006	0,003	0,004	0,004	0,004	0,001	0,001	0,003
				Mg (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	10	12	10	13	23	11	10	18
L2 (1,3)	14	10	13	13	12	14	14	16
L3 (1,8)	52	33	34	30	39	33	34	6
L4 (2,3)	21	27	18	15	18	24	25	6
L5 (2,8)	19	20	19	22	27	29	32	5
L6 (3,3)	27	19	24	24	31	27	31	7
				Co (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,004	0,039	0,038	0,026	0,078	0,003	0,018	0,020
L2 (1,3)	0,012	0,031	0,035	0,029	0,036	0,061	0,031	0,040
L3 (1,8)	0,056	0,034	0,053	0,057	0,056	0,059	0,051	0,020
L4 (2,3)	0,066	0,111	0,114	0,164	0,112	0,141	0,064	0,080
L5 (2,8)	0,082	0,140	0,107	0,173	0,143	0,248	0,123	0,080
L6 (3,3)	0,066	0,058	0,124	0,154	0,127	0,143	0,074	0,090
				Ba (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,220	0,080	0,689	0,570	1,44	0,36		0,16
L2 (1,3)	0,010	0,020	0,709	0,510	1,02	0,22		0,09
L3 (1,8)	0	0	0,769	0,800	0,77	0,28		0,02
L4 (2,3)	0,050	0,040	0,689	0,910	0,46	0,40		0,07
L5 (2,8)	0,090	0	0,629	1,000	0,46	0,47		0
L6 (3,3)	0	0	0,719	0,880	0,54	0,44		0,01

Profundidade (m)	Dez 2012	Jan 2013	Mar 2013	Mai 2013	Jul 2013	Set 2013	Jan 2014	Maciço
				Al (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0	0	0,25	0,21	0,83	0,14	0,06	0
L2 (1,3)	0,14	0,04	0,29	0,35	0,70	0,01	0	0
L3 (1,8)	0,27	0	0,28	0,22	0,82	0,01	0	0
L4 (2,3)	0,27	0,06	0,20	0,14	1,14	0,10	0,08	7
L5 (2,8)	0,46	0,15	0,31	0,19	1,10	0,11	0,01	23
L6 (3,3)	0,50	0	0,45	0,39	0,71	0,21	0	0
				Ca (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	127	147	110	171	434	136	30	310
L2 (1,3)	83	111	100	157	259	113	235	87
L3 (1,8)	80	73	48	65	89	72	32	46
L4 (2,3)	26	28	24	24	33	36	44	41
L5 (2,8)	25	28	24	30	42	32	45	38
L6 (3,3)	46	51	54	50	61	54	60	56
				Na (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	14	16	10	14	37	15	23	54
L2 (1,3)	40	17	19	16	18	19	27	80
L3 (1,8)	164	189	122	162	191	188	194	44
L4 (2,3)	240	443	367	464	417	405	317	184
L5 (2,8)	360	475	250	343	426	535	458	194
L6 (3,3)	194	155	205	233	357	282	266	299
				K (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	17	19	12	21	31	17	30	47
L2 (1,3)	88	19	24	21	16	28	91	68
L3 (1,8)	136	191	111	178	188	200	201	38
L4 (2,3)	186	410	287	421	382	392	340	110
L5 (2,8)	306	488	216	365	426	495	460	122
L6 (3,3)	172	168	192	267	368	282	280	152
				Sr (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	0,502	0,545	0,285	0,472	0,754	0,234	0,297	0,344
L2 (1,3)	0,284	0,401	0,343	0,454	0,367	0,294	0,564	0,177
L3 (1,8)	0,178	0,355	0,259	0,288	0,284	0,285	0,166	0,110
L4 (2,3)	0,146	0,238	0,197	0,179	0,162	0,236	0,218	0,083
L5 (2,8)	0,301	0,191	0,180	0,157	0,116	0,152	0,179	0,070
L6 (3,3)	0,307	0,381	0,239	0,237	0,231	0,274	0,273	0,136
				Alcalinidade (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	206	797	473	605	495	550	625	
L2 (1,3)	783	807	548	570	550	580	775	
L3 (1,8)	2318	2546	1722	800	1880	1810	1810	
L4 (2,3)	2614	4160	2911	2220	3060	2580	2030	
L5 (2,8)	3148	4577	2604	2380	2990	2420	2430	
L6 (3,3)	2485	2490	2632	2500	2920	2370	1800	

Profundidade (m)	Dez 2012	Jan 2013	Mar 2013	Mai 2013	Jul 2013	Set 2013	Jan 2014	Maciço
				DQO (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	55	155	99	112	80	62	108	334
L2 (1,3)	258	124	131	115	100	76	138	482
L3 (1,8)	375	269	298	286	311	312	287	283
L4 (2,3)	504	555	732	303	640	546	407	1694
L5 (2,8)	943	807	945	786	1039	1084	797	1014
L6 (3,3)	517	477	778	799	921	576	481	968
				DBO (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	11	73	22	11	13	6	4	
L2 (1,3)	102	49	26	14	26	12	11	
L3 (1,8)	114	136	67	168	85	139	69	
L4 (2,3)	128	329	338	179	188	182	142	
L5 (2,8)	360	571	352	228	265	348	229	
L6 (3,3)	153	270	328	196	232	71	68	
				Fe (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	21,9	42,9	5,5	70,4	94,0	43,6	7,6	1,0
L2 (1,3)	20,1	21,1	6,0	35,5	67,3	19,5	63,2	2068
L3 (1,8)	6,9	3,0	0,3	15,4	11,1	20,6	0,5	1,0
L4 (2,3)	0,7	2,2	0,8	2,2	2,6	3,0	0,8	8,0
L5 (2,8)	1,8	2,8	1,3	2,9	5,9	4,2	3,9	20,0
L6 (3,3)	1,2	3,8	0,6	2,9	2,6	3,8	3,4	3181
				SiO2 (mg.L⁻¹)				
L1 (0,8)	16	14	18	21	19	13		
L2 (1,3)	24	17	19	23	13	6	34	
L3 (1,8)	19	26	38	11	6	24	54	
L4 (2,3)	27	20	117	20	2	24	43	
L5 (2,8)	33	18	20	18	8	7	15	
L6 (3,3)	36	23	21	37	19	30	28	

Resultados das amostras de água subterrânea

Data	Poço	pH	CE µS.cm ⁻¹	Alcalinidade mg.L ⁻¹	Cl mg.L ⁻¹	PO4 mg.L ⁻¹	NO2 mg.L ⁻¹	NO3 mg.L ⁻¹	DQO mg.L ⁻¹	DBO mg.L ⁻¹	NAT mg.L ⁻¹	NTK mg.L ⁻¹	Zn mg.L ⁻¹	Pb mg.L ⁻¹	Cd mg.L ⁻¹	Ni mg.L ⁻¹
06/12/2012	PM03	5,6	154	20	19	0,1	,122	6	17	4	0	10	0,1	0,2	0,2	0,3
06/12/2012	PM29	6,9	1067	445	75	0,8	0,012	2	206	19	72	84	0,2	0,1	0,2	0,3
06/12/2012	PM17	4,2	305	0	224	0,8	0,037	10	28	7	14	23	0,4	1,8	0,2	0,3
06/12/2012	PM19	5,0	34	0	2	0,7	0,003	2	6	0	0	11	0,1	0,1	0,2	0,3
06/12/2012	PM23	4,9	38	0	14	0,5	0,003	2	15	4	0	10	0,3	0,3	0,2	0,4
25/02/2013	PM03	6,2	223	24	24	0,2	0,008	5	15	4	0,1	1	0,1	0,0	0,1	0,2
25/02/2013	PM29	7,0	2084	1485	235	0,5	0,002	5	194	18	66	105	0,1	0,2	0,1	0,2
25/02/2013	PM17	5,7	286	6	140	0,2	0,013	11	11	3	9	0	0,1	0,0	0,1	0,1
25/02/2013	PM19	5,0	38	0	5	0,3	0,003	2	2	0	0,1	3	0,1	0,3	0,1	0,2
25/02/2013	PM23	4,6	40	0	3	0,0	0,002	2	2	0	0	0	0,1	0,0	0,1	0,1
19/04/2013	PM03	6,0	176	59	11	0,4	0,004	4	15	5	0,1	2				
19/04/2013	PM29	6,8	1829	896	70	0,7	0,003	4	137	14	66	93				
19/04/2013	PM17	6,3	231	20	21	0,4	0,031	9	9	3	46	6				
19/04/2013	PM19	5,5	56	7	6	0,4	0,010	3	6	0	0	0				
19/04/2013	PM23	4,7	29	0	5	0,1	0,003	2	2	0	0	4				
01/07/2013	PM03	5,6	144	29	11	0,5	0,004	4	14	5	0,20	4	0,1	0,4	0,1	0,1
01/07/2013	PM29	6,9	1550	834	125	3,0	0,002	3	118	11	81	85	0,1	0,3	0,1	0,2
01/07/2009	PM17	5,85	206,9	18	15	0,4	0,027	10,01	6	2	2,8	2,9	0,1	0,3	0,0	0,1
01/07/2013	PM19	5,1	21	2	9	0,4	0,004	3	11	4	0,2	8	0,1	0,6	0,0	0,1
01/07/2013	PM23	4,9	53	0	2	0,1	0,003	1	2	0	0	0	0,1	0,4	0,1	0,1

Data	Poço	Fe mg.L ⁻¹	Mn mg.L ⁻¹	Cu mg.L ⁻¹	Cr mg.L ⁻¹	Al mg.L ⁻¹	Ba mg.L ⁻¹	Co mg.L ⁻¹	Ca mg.L ⁻¹	Mg mg.L ⁻¹	Na mg.L ⁻¹	K mg.L ⁻¹	Sr mg.L ⁻¹	Ag mg.L ⁻¹	SO4 mg.L ⁻¹
06/12/2012	PM03	23	0,1	0,000	0,05	1	0,00	0,08	9	6	3	2	0,14		0
06/12/2012	PM29	25	0,5	0,000	0,05	0	0,00	0,08	18	8	35	38	0,19		0
06/12/2012	PM17	202	0,7	0,028	0,15	86	0,00	0,17	4	1	11	16	0,06		0
06/12/2012	PM19	1	0,0	0,000	0,05	0	0,00	0,07	1	0	2	1	0,01		0
06/12/2012	PM23	197	1,5	0,146	0,14	43	0,00	0,15	1	3	2	6	0,04		0
25/02/2013	PM03	8	0,0	0,003	0,15	0	0,15	0,03	6	5	2	3	0,12	0,031	0
25/02/2013	PM29	74	1,8	0,012	0,10	1	0,29	0,06	27	17	76	77	0,32	0,002	0
25/02/2013	PM17	2	0,2	0,006	0,00	2	0,16	0,06		0	14	21	0,03	0,013	0
25/02/2013	PM19	1	0,0	0,022	0,18	1	0,00	0,04	0	0	3	2	0,01	0,005	0
25/02/2013	PM23	0	0,0	0,010	0,00	0	0,00	0,03	1	1	1	1	0,01	0,000	0
01/07/2013	PM03	2,2	0,0	0,00	0,08	0	0,00	0,03	9,2	4,5	1,8	2,0	0,06	0,006	0
01/07/2013	PM29	17,6	0,8	0,00	0,09	0	0,00	0,07	57,5	9,9	45,9	45,9	0,19	0,008	0
01/07/2009	PM17	0,8	0,4	0,00	0,10	1	0,00	0,06	5,1	0,5	5,7	21,9	0,06	0,006	0
01/07/2013	PM19	6,3	0,1	0,01	0,10	3	0,00	0,05	4,5	0,5	1,6	2,4	0,06	0,005	0
01/07/2013	PM23	0,8	0,0	0,01	0,09	0	0,00	0,04	2,2	0,4	0,9	0,9	0,06	0,005	0

APÊNDICE F – RESULTADOS DA ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA AMOSTRA DE ÁGUA DA NASCENTE DO FIM DO TALUDE DO LIXÃO DESATIVADO DE SÃO CARLOS

Parâmetros	Resultados
Alcalinidade total (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	504
Condutividade elétrica (µS.cm ⁻¹)	1567
DBO (mg O ₂ .L ⁻¹)	72
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	147
Dureza total (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	144
Fosfato total (mg PO ₄ ³⁻ .L ⁻¹)	3,87
Nitrogênio amoniacal (mg N.L ⁻¹)	88
Nitrogênio Nitrato (mg N.L ⁻¹)	< 0,001
Nitrogênio Nitrito (mg N.L ⁻¹)	0,186
Nitrogênio total Kjeldhal (mg N.L ⁻¹)	92
pH	7,05
Sólidos sedimentáveis (mL.L ⁻¹ .H ⁻¹)	0,4
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	672
Sólidos totais fixos (mg.L ⁻¹)	344
Sólidos totais voláteis (mg.L ⁻¹)	328
Zinco (mg Z.L ⁻¹)	0,029
Cádmio (mg Cd.L ⁻¹)	0,05
Níquel (mg Ni.L ⁻¹)	0,033
Ferro total (mg Fe.L ⁻¹)	25,88
Manganês total (mg Mn.L ⁻¹)	0,398
Cobre (mg Cu.L ⁻¹)	0,014
Cromo total (mg Cr.L ⁻¹)	0,075
COT (mg C.L ⁻¹)	147,2

APÊNDICE G – RESULTADOS DA MODELAGEM DE ESPECIAÇÃO QUÍMICA, A PARTIR DO SOFTWARE PHREEQC

LISÍMETRO 1

-----Description of solution-----						
	pH	=	7.500			
	pe	=	-1.300			
Specific Conductance (µS/cm, 25°C)		=	1220			
Density (g/cm³)		=	0.99778			
Volume (L)		=	1.00327			
Activity of water		=	1.000			
Ionic strength		=	1.645e-02			
Mass of water (kg)		=	1.000e+00			
Total carbon (mol/kg)		=	1.137e-02			
Total CO2 (mol/kg)		=	1.137e-02			
Temperature (°C)		=	25.00			
Electrical balance (eq)		=	2.563e-03			
Percent error, 100*(Cat- An)/(Cat+ An)		=	10.29			
Iterations		=	10			
Total H		=	1.110407e+02			
Total O		=	5.554106e+01			
-----Redox couples-----						
Redox couple	pe	Eh (volts)				
N(-3)/N(3)	4.5237	0.2676				
N(-3)/N(5)	5.3269	0.3151				
N(3)/N(5)	7.7366	0.4577				
-----Distribution of species-----						
Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma	mole V cm³/mol
OH-	3.648e-07	3.200e-07	-6.438	-6.495	-0.057	-4.00
H+	3.527e-08	3.162e-08	-7.453	-7.500	-0.047	0.00
H2O	5.551e+01	9.996e-01	1.744	-0.000	0.000	18.07
Al	5.193e-06					
Al (OH) 4-	5.098e-06	4.492e-06	-5.293	-5.348	-0.055	(0)
Al (OH) 3	7.511e-08	7.540e-08	-7.124	-7.123	0.002	(0)
Al (OH) 2+	1.830e-08	1.619e-08	-7.738	-7.791	-0.053	(0)
AlF2+	9.906e-10	8.763e-10	-9.004	-9.057	-0.053	(0)
AlF3	3.186e-10	3.198e-10	-9.497	-9.495	0.002	(0)
AlOH+2	1.067e-10	6.534e-11	-9.972	-10.185	-0.213	-27.48
AlF+2	9.854e-11	6.032e-11	-10.006	-10.220	-0.213	(0)
AlF4-	4.188e-12	3.690e-12	-11.378	-11.433	-0.055	(0)
Al+3	5.560e-13	2.081e-13	-12.255	-12.682	-0.427	-41.74
Ba	2.624e-06					
Ba+2	2.470e-06	1.484e-06	-5.607	-5.829	-0.221	-12.45
BaHCO3+	1.434e-07	1.262e-07	-6.843	-6.899	-0.055	(0)
BaCO3	1.005e-08	1.009e-08	-7.998	-7.996	0.002	-10.70
BaOH+	1.800e-12	1.589e-12	-11.745	-11.799	-0.054	(0)
C (4)	1.137e-02					
HCO3-	1.004e-02	8.876e-03	-1.998	-2.052	-0.053	24.81
CO2	6.290e-04	6.313e-04	-3.201	-3.200	0.002	29.09
FeHCO3+	2.663e-04	2.344e-04	-3.575	-3.630	-0.055	(0)
CaHCO3+	2.430e-04	2.154e-04	-3.614	-3.667	-0.052	9.74
FeCO3	8.306e-05	8.338e-05	-4.081	-4.079	0.002	(0)
CaCO3	4.191e-05	4.207e-05	-4.378	-4.376	0.002	-14.60
MgHCO3+	3.053e-05	2.684e-05	-4.515	-4.571	-0.056	5.55
CO3-2	2.151e-05	1.316e-05	-4.667	-4.881	-0.213	-4.90
MnCO3	8.529e-06	8.562e-06	-5.069	-5.067	0.002	(0)
MnHCO3+	7.336e-06	6.478e-06	-5.135	-5.189	-0.054	(0)
MgCO3	3.233e-06	3.246e-06	-5.490	-5.489	0.002	-17.09
NaHCO3	2.851e-06	2.862e-06	-5.545	-5.543	0.002	1.80
PbCO3	4.387e-07	4.404e-07	-6.358	-6.356	0.002	(0)
SrHCO3+	2.290e-07	2.025e-07	-6.640	-6.693	-0.053	(0)
NaCO3-	1.597e-07	1.406e-07	-6.797	-6.852	-0.055	-0.87
BaHCO3+	1.434e-07	1.262e-07	-6.843	-6.899	-0.055	(0)
ZnCO3	7.638e-08	7.667e-08	-7.117	-7.115	0.002	(0)
ZnHCO3+	3.706e-08	3.262e-08	-7.431	-7.487	-0.055	(0)
Zn (CO3) 2-2	3.596e-08	2.158e-08	-7.444	-7.666	-0.222	(0)
Pb (CO3) 2-2	2.427e-08	1.456e-08	-7.615	-7.837	-0.222	(0)
PbHCO3+	1.542e-08	1.357e-08	-7.812	-7.867	-0.055	(0)
SrCO3	1.249e-08	1.254e-08	-7.904	-7.902	0.002	-14.13
BaCO3	1.005e-08	1.009e-08	-7.998	-7.996	0.002	-10.70

		CuCO ₃	1.303e-09	1.308e-09	-8.885	-8.883	0.002	(0)
		CuHCO ₃ +	9.352e-11	8.231e-11	-10.029	-10.085	-0.055	(0)
		Cu(CO ₃) ₂ -2	3.613e-11	2.168e-11	-10.442	-10.664	-0.222	(0)
Ca	3.396e-03							
		Ca+2	3.110e-03	1.902e-03	-2.507	-2.721	-0.213	-17.85
		CaHCO ₃ +	2.430e-04	2.154e-04	-3.614	-3.667	-0.052	9.74
		CaCO ₃	4.191e-05	4.207e-05	-4.378	-4.376	0.002	-14.60
		CaHPO ₄	1.425e-06	1.430e-06	-5.846	-5.845	0.002	(0)
		CaPO ₄ -	1.210e-07	1.070e-07	-6.917	-6.971	-0.053	(0)
		CaH ₂ PO ₄ +	3.843e-08	3.399e-08	-7.415	-7.469	-0.053	(0)
		CaOH+	1.134e-08	9.980e-09	-7.945	-8.001	-0.055	(0)
Cl	9.034e-04							
		Cl-	9.030e-04	7.929e-04	-3.044	-3.101	-0.056	18.17
		FeCl+	3.283e-07	2.890e-07	-6.484	-6.539	-0.055	(0)
		CuCl ₂ -	4.381e-08	3.851e-08	-7.358	-7.414	-0.056	(0)
		MnCl+	2.995e-08	2.645e-08	-7.524	-7.578	-0.054	-3.02
		CuCl ₃ -2	7.961e-11	4.840e-11	-10.099	-10.315	-0.216	(0)
		ZnCl+	7.086e-11	6.229e-11	-10.150	-10.206	-0.056	-13.88
		PbCl+	6.905e-11	6.077e-11	-10.161	-10.216	-0.055	8.02
		ZnOHCl	2.413e-11	2.423e-11	-10.617	-10.616	0.002	(0)
		MnCl ₂	9.119e-12	9.154e-12	-11.040	-11.038	0.002	85.89
		PbCl ₂	7.607e-14	7.636e-14	-13.119	-13.117	0.002	34.97
		ZnCl ₂	5.152e-14	5.172e-14	-13.288	-13.286	0.002	102.03
		CuCl+	4.491e-14	3.948e-14	-13.348	-13.404	-0.056	0.73
		MnCl ₃ -	2.264e-15	1.999e-15	-14.645	-14.699	-0.054	43.48
		PbCl ₃ -	5.464e-17	4.809e-17	-16.262	-16.318	-0.055	66.04
		ZnCl ₃ -	5.234e-17	4.601e-17	-16.281	-16.337	-0.056	16.95
		CuCl ₂	1.675e-17	1.681e-17	-16.776	-16.774	0.002	31.02
		FeCl+2	4.977e-20	3.026e-20	-19.303	-19.519	-0.216	(0)
		PbCl ₄ -2	3.042e-20	1.825e-20	-19.517	-19.739	-0.222	101.71
		ZnCl ₄ -2	3.007e-20	1.828e-20	-19.522	-19.738	-0.216	145.58
		FeCl ₂ +	1.214e-22	1.072e-22	-21.916	-21.970	-0.054	(0)
		CuCl ₃ -	5.380e-23	4.730e-23	-22.269	-22.325	-0.056	(0)
		FeCl ₃	8.465e-27	8.497e-27	-26.072	-26.071	0.002	(0)
		CuCl ₄ -2	3.091e-28	1.879e-28	-27.510	-27.726	-0.216	(0)
Cu(1)	2.659e-07							
		Cu+	2.220e-07	1.937e-07	-6.654	-6.713	-0.059	(0)
		CuCl ₂ -	4.381e-08	3.851e-08	-7.358	-7.414	-0.056	(0)
		CuCl ₃ -2	7.961e-11	4.840e-11	-10.099	-10.315	-0.216	(0)
Cu(2)	1.854e-09							
		CuCO ₃	1.303e-09	1.308e-09	-8.885	-8.883	0.002	(0)
		Cu(OH) ₂	3.848e-10	3.863e-10	-9.415	-9.413	0.002	(0)
		CuHCO ₃ +	9.352e-11	8.231e-11	-10.029	-10.085	-0.055	(0)
		Cu(CO ₃) ₂ -2	3.613e-11	2.168e-11	-10.442	-10.664	-0.222	(0)
		Cu+2	2.993e-11	1.850e-11	-10.524	-10.733	-0.209	-26.33
		CuOH+	6.653e-12	5.848e-12	-11.177	-11.233	-0.056	(0)
		CuCl+	4.491e-14	3.948e-14	-13.348	-13.404	-0.056	0.73
		CuF+	1.109e-14	9.759e-15	-13.955	-14.011	-0.055	(0)
		Cu(OH) ₃ -	8.359e-16	7.357e-16	-15.078	-15.133	-0.055	(0)
		Cu ₂ (OH) ₂ +2	2.494e-17	1.497e-17	-16.603	-16.825	-0.222	(0)
		CuCl ₂	1.675e-17	1.681e-17	-16.776	-16.774	0.002	31.02
		Cu(OH) ₄ -2	7.734e-21	4.640e-21	-20.112	-20.333	-0.222	(0)
		CuCl ₃ -	5.380e-23	4.730e-23	-22.269	-22.325	-0.056	(0)
		CuCl ₄ -2	3.091e-28	1.879e-28	-27.510	-27.726	-0.216	(0)
F	3.372e-05							
		F-	3.305e-05	2.899e-05	-4.481	-4.538	-0.057	-1.22
		MgF+	5.616e-07	4.948e-07	-6.251	-6.306	-0.055	-10.50
		FeF+	8.696e-08	7.653e-08	-7.061	-7.116	-0.055	(0)
		NaF	9.528e-09	9.564e-09	-8.021	-8.019	0.002	7.26
		MnF+	1.860e-09	1.642e-09	-8.731	-8.785	-0.054	(0)
		HF	1.370e-09	1.375e-09	-8.863	-8.862	0.002	12.50
		AlF ₂ +	9.906e-10	8.763e-10	-9.004	-9.057	-0.053	(0)
		AlF ₃	3.186e-10	3.198e-10	-9.497	-9.495	0.002	(0)
		AlF+2	9.854e-11	6.032e-11	-10.006	-10.220	-0.213	(0)
		ZnF+	1.358e-11	1.195e-11	-10.867	-10.923	-0.055	(0)
		AlF ₄ -	4.188e-12	3.690e-12	-11.378	-11.433	-0.055	(0)
		PbF+	1.128e-12	9.923e-13	-11.948	-12.003	-0.055	(0)
		HF ₂ -	1.737e-13	1.529e-13	-12.760	-12.816	-0.055	22.15
		CuF+	1.109e-14	9.759e-15	-13.955	-14.011	-0.055	(0)
		PbF ₂	5.851e-16	5.873e-16	-15.233	-15.231	0.002	(0)
		FeF+2	9.549e-17	5.806e-17	-16.020	-16.236	-0.216	(0)
		FeF ₂ +	7.587e-17	6.700e-17	-16.120	-16.174	-0.054	(0)
		FeF ₃	3.066e-18	3.078e-18	-17.513	-17.512	0.002	(0)
		PbF ₃ -	1.401e-19	1.233e-19	-18.853	-18.909	-0.055	(0)
		PbF ₄ -2	2.852e-24	1.711e-24	-23.545	-23.767	-0.222	(0)
		SiF ₆ -2	3.198e-31	1.944e-31	-30.495	-30.711	-0.216	42.94
Fe(2)	7.814e-04							
		Fe+2	4.271e-04	2.640e-04	-3.369	-3.578	-0.209	-21.85
		FeHCO ₃ +	2.663e-04	2.344e-04	-3.575	-3.630	-0.055	(0)
		FeCO ₃	8.306e-05	8.338e-05	-4.081	-4.079	0.002	(0)
		FeOH+	2.989e-06	2.639e-06	-5.524	-5.579	-0.054	(0)
		FeHPO ₄	1.436e-06	1.441e-06	-5.843	-5.841	0.002	(0)
		FeCl+	3.283e-07	2.890e-07	-6.484	-6.539	-0.055	(0)
		FeH ₂ PO ₄ +	1.045e-07	9.241e-08	-6.981	-7.034	-0.053	(0)
		FeF+	8.696e-08	7.653e-08	-7.061	-7.116	-0.055	(0)
		Fe(OH) ₂	7.074e-10	7.101e-10	-9.150	-9.149	0.002	(0)
		Fe(OH) ₃ -	9.445e-13	8.340e-13	-12.025	-12.079	-0.054	(0)
Fe(3)	1.436e-08							

Fe (OH) 3	1.095e-08	1.099e-08	-7.960	-7.959	0.002	(0)
Fe (OH) 2+	3.052e-09	2.700e-09	-8.515	-8.569	-0.053	(0)
Fe (OH) 4-	3.583e-10	3.170e-10	-9.446	-9.499	-0.053	(0)
FeOH+2	4.242e-13	2.579e-13	-12.372	-12.589	-0.216	(0)
FeF+2	9.549e-17	5.806e-17	-16.020	-16.236	-0.216	(0)
FeF2+	7.587e-17	6.700e-17	-16.120	-16.174	-0.054	(0)
Fe+3	3.377e-18	1.264e-18	-17.471	-17.898	-0.427	(0)
FeF3	3.066e-18	3.078e-18	-17.513	-17.512	0.002	(0)
FeHPO4+	5.282e-19	4.664e-19	-18.277	-18.331	-0.054	(0)
FeH2PO4+2	3.881e-19	2.375e-19	-18.411	-18.624	-0.213	(0)
FeCl+2	4.977e-20	3.026e-20	-19.303	-19.519	-0.216	(0)
FeCl2+	1.214e-22	1.072e-22	-21.916	-21.970	-0.054	(0)
Fe2 (OH) 2+4	1.382e-23	1.791e-24	-22.860	-23.747	-0.887	(0)
FeCl3	8.465e-27	8.497e-27	-26.072	-26.071	0.002	(0)
Fe3 (OH) 4+5	2.459e-29	1.010e-30	-28.609	-29.996	-1.387	(0)
H (0)	5.615e-16					
H2	2.808e-16	2.818e-16	-15.552	-15.550	0.002	28.61
K	4.351e-04					
K+	4.351e-04	3.818e-04	-3.361	-3.418	-0.057	9.09
KHPO4-	1.154e-09	1.021e-09	-8.938	-8.991	-0.053	38.22
Mg	4.529e-04					
Mg+2	4.182e-04	2.584e-04	-3.379	-3.588	-0.209	-21.54
MgHCO3+	3.053e-05	2.684e-05	-4.515	-4.571	-0.056	5.55
MgCO3	3.233e-06	3.246e-06	-5.490	-5.489	0.002	-17.09
MgF+	5.616e-07	4.948e-07	-6.251	-6.306	-0.055	-10.50
MgHPO4	2.616e-07	2.626e-07	-6.582	-6.581	0.002	(0)
MgOH+	3.338e-08	2.965e-08	-7.477	-7.528	-0.051	(0)
MgPO4-	2.216e-08	1.960e-08	-7.654	-7.708	-0.053	(0)
MgH2PO4+	6.647e-09	5.879e-09	-8.177	-8.231	-0.053	(0)
Mn (2)	2.915e-05					
Mn+2	1.324e-05	8.188e-06	-4.878	-5.087	-0.209	-19.53
MnCO3	8.529e-06	8.562e-06	-5.069	-5.067	0.002	(0)
MnHCO3+	7.336e-06	6.478e-06	-5.135	-5.189	-0.054	(0)
MnCl+	2.995e-08	2.645e-08	-7.524	-7.578	-0.054	-3.02
MnOH+	7.534e-09	6.653e-09	-8.123	-8.177	-0.054	(0)
MnF+	1.860e-09	1.642e-09	-8.731	-8.785	-0.054	(0)
MnCl2	9.119e-12	9.154e-12	-11.040	-11.038	0.002	85.89
Mn (NO3) 2	5.076e-13	5.096e-13	-12.294	-12.293	0.002	41.04
MnCl3-	2.264e-15	1.999e-15	-14.645	-14.699	-0.054	43.48
Mn (OH) 3-	4.642e-18	4.099e-18	-17.333	-17.387	-0.054	(0)
Mn (3)	3.389e-32					
Mn+3	3.389e-32	1.268e-32	-31.470	-31.897	-0.427	(0)
N (-3)	4.216e-03					
NH4+	4.151e-03	3.622e-03	-2.382	-2.441	-0.059	18.04
NH3	6.503e-05	6.528e-05	-4.187	-4.185	0.002	24.42
N (3)	1.786e-06					
NO2-	1.786e-06	1.563e-06	-5.748	-5.806	-0.058	25.06
N (5)	1.429e-04					
NO3-	1.429e-04	1.250e-04	-3.845	-3.903	-0.058	29.58
PbNO3+	4.045e-12	3.560e-12	-11.393	-11.449	-0.055	(0)
Mn (NO3) 2	5.076e-13	5.096e-13	-12.294	-12.293	0.002	41.04
Na	6.530e-04					
Na+	6.500e-04	5.734e-04	-3.187	-3.242	-0.054	-1.34
NaHCO3	2.851e-06	2.862e-06	-5.545	-5.543	0.002	1.80
NaCO3-	1.597e-07	1.406e-07	-6.797	-6.852	-0.055	-0.87
NaF	9.528e-09	9.564e-09	-8.021	-8.019	0.002	7.26
NaHPO4-	1.733e-09	1.533e-09	-8.761	-8.814	-0.053	34.66
NaOH	1.828e-20	1.835e-20	-19.738	-19.736	0.002	(0)
O (0)	0.000e+00					
O2	0.000e+00	0.000e+00	-61.282	-61.280	0.002	30.40
P	6.463e-06					
HPO4-2	2.255e-06	1.371e-06	-5.647	-5.863	-0.216	7.07
FeHPO4	1.436e-06	1.441e-06	-5.843	-5.841	0.002	(0)
CaHPO4	1.425e-06	1.430e-06	-5.846	-5.845	0.002	(0)
H2PO4-	7.895e-07	6.984e-07	-6.103	-6.156	-0.053	33.32
MgHPO4	2.616e-07	2.626e-07	-6.582	-6.581	0.002	(0)
CaPO4-	1.210e-07	1.070e-07	-6.917	-6.971	-0.053	(0)
FeH2PO4+	1.045e-07	9.241e-08	-6.981	-7.034	-0.053	(0)
CaH2PO4+	3.843e-08	3.399e-08	-7.415	-7.469	-0.053	(0)
MgPO4-	2.216e-08	1.960e-08	-7.654	-7.708	-0.053	(0)
MgH2PO4+	6.647e-09	5.879e-09	-8.177	-8.231	-0.053	(0)
NaHPO4-	1.733e-09	1.533e-09	-8.761	-8.814	-0.053	34.66
KHPO4-	1.154e-09	1.021e-09	-8.938	-8.991	-0.053	38.22
PO4-3	6.236e-11	1.955e-11	-10.205	-10.709	-0.504	-22.44
H3PO4	3.239e-12	3.252e-12	-11.490	-11.488	0.002	47.41
FeHPO4+	5.282e-19	4.664e-19	-18.277	-18.331	-0.054	(0)
FeH2PO4+2	3.881e-19	2.375e-19	-18.411	-18.624	-0.213	(0)
Pb	4.831e-07					
PbCO3	4.387e-07	4.404e-07	-6.358	-6.356	0.002	(0)
Pb (CO3) 2-2	2.427e-08	1.456e-08	-7.615	-7.837	-0.222	(0)
PbHCO3+	1.542e-08	1.357e-08	-7.812	-7.867	-0.055	(0)
Pb+2	3.209e-09	1.925e-09	-8.494	-8.716	-0.222	-15.25
PbOH+	1.348e-09	1.187e-09	-8.870	-8.926	-0.055	(0)
PbCl+	6.905e-11	6.077e-11	-10.161	-10.216	-0.055	8.02
Pb (OH) 2	1.454e-11	1.459e-11	-10.838	-10.836	0.002	(0)
PbNO3+	4.045e-12	3.560e-12	-11.393	-11.449	-0.055	(0)
PbF+	1.128e-12	9.923e-13	-11.948	-12.003	-0.055	(0)
PbCl2	7.607e-14	7.636e-14	-13.119	-13.117	0.002	34.97

Pb(OH) 3-	6.018e-15	5.296e-15	-14.221	-14.276	-0.055	(0)
PbF2	5.851e-16	5.873e-16	-15.233	-15.231	0.002	(0)
Pb2OH+3	1.614e-16	5.114e-17	-15.792	-16.291	-0.499	(0)
PbCl3-	5.464e-17	4.809e-17	-16.262	-16.318	-0.055	66.04
Pb(OH) 4-2	6.392e-19	3.835e-19	-18.194	-18.416	-0.222	(0)
PbF3-	1.401e-19	1.233e-19	-18.853	-18.909	-0.055	(0)
PbCl4-2	3.042e-20	1.825e-20	-19.517	-19.739	-0.222	101.71
Pb3(OH) 4+2	1.565e-20	9.392e-21	-19.805	-20.027	-0.222	(0)
PbF4-2	2.852e-24	1.711e-24	-23.545	-23.767	-0.222	(0)
Si	2.166e-04					
H4SiO4	2.154e-04	2.162e-04	-3.667	-3.665	0.002	52.08
H3SiO4-	1.147e-06	1.008e-06	-5.940	-5.996	-0.056	28.06
H2SiO4-2	3.543e-12	2.169e-12	-11.451	-11.664	-0.213	(0)
SiF6-2	3.198e-31	1.944e-31	-30.495	-30.711	-0.216	42.94
Sr	2.673e-06					
Sr+2	2.432e-06	1.492e-06	-5.614	-5.826	-0.212	-17.51
SrHCO3+	2.290e-07	2.025e-07	-6.640	-6.693	-0.053	(0)
SrCO3	1.249e-08	1.254e-08	-7.904	-7.902	0.002	-14.13
SrOH+	2.739e-12	2.418e-12	-11.562	-11.616	-0.054	(0)
Zn	1.990e-07					
ZnCO3	7.638e-08	7.667e-08	-7.117	-7.115	0.002	(0)
Zn+2	4.801e-08	2.919e-08	-7.319	-7.535	-0.216	-25.07
ZnHCO3+	3.706e-08	3.262e-08	-7.431	-7.487	-0.055	(0)
Zn(CO3) 2-2	3.596e-08	2.158e-08	-7.444	-7.666	-0.222	(0)
ZnOH+	1.150e-09	1.012e-09	-8.939	-8.995	-0.055	(0)
Zn(OH) 2	3.658e-10	3.672e-10	-9.437	-9.435	0.002	(0)
ZnCl+	7.086e-11	6.229e-11	-10.150	-10.206	-0.056	-13.88
ZnOHCl	2.413e-11	2.423e-11	-10.617	-10.616	0.002	(0)
ZnF+	1.358e-11	1.195e-11	-10.867	-10.923	-0.055	(0)
ZnCl2	5.152e-14	5.172e-14	-13.288	-13.286	0.002	102.03
Zn(OH) 3-	4.171e-14	3.671e-14	-13.380	-13.435	-0.055	(0)
ZnCl3-	5.234e-17	4.601e-17	-16.281	-16.337	-0.056	16.95
Zn(OH) 4-2	3.065e-19	1.839e-19	-18.514	-18.735	-0.222	(0)
ZnCl4-2	3.007e-20	1.828e-20	-19.522	-19.738	-0.216	145.58

LISÍMETRO 2

-----Description of solution-----						
pH		= 7.400				
pe		= -7.100				
Specific Conductance (µS/cm, 24°C)		= 1253				
Density (g/cm³)		= 0.99800				
Volume (L)		= 1.00308				
Activity of water		= 1.000				
Ionic strength		= 1.616e-02				
Mass of water (kg)		= 1.000e+00				
Total carbon (mol/kg)		= 1.232e-02				
Total CO2 (mol/kg)		= 1.232e-02				
Temperature (°C)		= 24.00				
Electrical balance (eq)		= 2.045e-03				
Percent error, 100*(Cat- An)/(Cat+ An)		= 7.97				
Iterations		= 11				
Total H		= 1.110459e+02				
Total O		= 5.554314e+01				

-----Redox couples-----						
Redox couple		pe	Eh (volts)			
N(-3)/N(3)		4.7470	0.2799			
N(-3)/N(5)		5.4964	0.3241			
N(3)/N(5)		7.7445	0.4566			

-----Distribution of species-----						
Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma	mole V cm³/mol
OH-	2.681e-07	2.354e-07	-6.572	-6.628	-0.056	-4.04
H+	4.437e-08	3.981e-08	-7.353	-7.400	-0.047	0.00
H2O	5.551e+01	9.996e-01	1.744	-0.000	0.000	18.06
Al	3.710e-07					
Al(OH) 4-	3.617e-07	3.190e-07	-6.442	-6.496	-0.054	(0)
Al(OH) 3	6.807e-09	6.832e-09	-8.167	-8.165	0.002	(0)
Al(OH) 2+	2.246e-09	1.989e-09	-8.649	-8.701	-0.053	(0)
AlF2+	1.351e-10	1.196e-10	-9.869	-9.922	-0.053	(0)
AlF3	3.389e-11	3.402e-11	-10.470	-10.468	0.002	(0)
AlOH+2	1.795e-11	1.103e-11	-10.746	-10.957	-0.211	-27.45
AlF+2	1.726e-11	1.061e-11	-10.763	-10.974	-0.211	(0)
AlF4-	3.471e-13	3.062e-13	-12.460	-12.514	-0.054	(0)
Al+3	1.252e-13	4.721e-14	-12.902	-13.326	-0.423	-41.68
Ba	1.603e-06					
Ba+2	1.505e-06	9.083e-07	-5.822	-6.042	-0.219	-12.51
BaHCO3+	9.283e-08	8.179e-08	-7.032	-7.087	-0.055	(0)
BaCO3	5.127e-09	5.146e-09	-8.290	-8.289	0.002	-10.71
BaOH+	8.742e-13	7.728e-13	-12.058	-12.112	-0.054	(0)
C(4)	1.232e-02					
HCO3-	1.095e-02	9.695e-03	-1.961	-2.013	-0.053	24.73
CO2	8.759e-04	8.792e-04	-3.058	-3.056	0.002	29.33

Ca	CaHCO3+	2.171e-04	1.927e-04	-3.663	-3.715	-0.052	9.70	
	FeHCO3+	1.285e-04	1.133e-04	-3.891	-3.946	-0.055	(0)	
	MgHCO3+	4.219e-05	3.713e-05	-4.375	-4.430	-0.055	5.52	
	FeCO3	3.124e-05	3.136e-05	-4.505	-4.504	0.002	(0)	
	CaCO3	2.905e-05	2.916e-05	-4.537	-4.535	0.002	-14.60	
	CO3-2	1.820e-05	1.119e-05	-4.740	-4.951	-0.211	-4.98	
	MnHCO3+	9.218e-06	8.149e-06	-5.035	-5.089	-0.054	(0)	
	MnCO3	8.351e-06	8.382e-06	-5.078	-5.077	0.002	(0)	
	NaHCO3	3.970e-06	3.985e-06	-5.401	-5.400	0.002	1.80	
	MgCO3	3.444e-06	3.457e-06	-5.463	-5.461	0.002	-17.09	
	PbCO3	4.815e-07	4.833e-07	-6.317	-6.316	0.002	(0)	
	NaCO3-	1.634e-07	1.440e-07	-6.787	-6.842	-0.055	-0.96	
	BaHCO3+	9.283e-08	8.179e-08	-7.032	-7.087	-0.055	(0)	
	ZnCO3	5.517e-08	5.538e-08	-7.258	-7.257	0.002	(0)	
	ZnHCO3+	3.436e-08	3.027e-08	-7.464	-7.519	-0.055	(0)	
	Pb (CO3) 2-2	2.254e-08	1.359e-08	-7.647	-7.867	-0.220	(0)	
	Zn (CO3) 2-2	2.198e-08	1.325e-08	-7.658	-7.878	-0.220	(0)	
	PbHCO3+	2.172e-08	1.914e-08	-7.663	-7.718	-0.055	(0)	
	CdHCO3+	1.042e-08	9.181e-09	-7.982	-8.037	-0.055	(0)	
	BaCO3	5.127e-09	5.146e-09	-8.290	-8.289	0.002	-10.71	
	CdCO3	2.652e-10	2.662e-10	-9.576	-9.575	0.002	(0)	
	Cd (CO3) 2-2	1.563e-11	9.419e-12	-10.806	-11.026	-0.220	(0)	
	CuCO3	1.598e-15	1.604e-15	-14.796	-14.795	0.002	(0)	
	CuHCO3+	1.472e-16	1.297e-16	-15.832	-15.887	-0.055	(0)	
	Cu (CO3) 2-2	3.749e-17	2.260e-17	-16.426	-16.646	-0.220	(0)	
	2.822e-03							
	Ca+2	2.575e-03	1.582e-03	-2.589	-2.801	-0.212	-17.87	
	CaHCO3+	2.171e-04	1.927e-04	-3.663	-3.715	-0.052	9.70	
CaCO3	2.905e-05	2.916e-05	-4.537	-4.535	0.002	-14.60		
CaHPO4	6.734e-07	6.760e-07	-6.172	-6.170	0.002	(0)		
CaPO4-	4.452e-08	3.942e-08	-7.351	-7.404	-0.053	(0)		
CaH2PO4+	2.296e-08	2.033e-08	-7.639	-7.692	-0.053	(0)		
CaOH+	7.482e-09	6.593e-09	-8.126	-8.181	-0.055	(0)		
Cd	6.233e-08							
	Cd+2	4.968e-08	2.995e-08	-7.304	-7.524	-0.220	-18.52	
	CdHCO3+	1.042e-08	9.181e-09	-7.982	-8.037	-0.055	(0)	
	CdCl+	1.846e-09	1.627e-09	-8.734	-8.789	-0.055	5.75	
	CdCO3	2.652e-10	2.662e-10	-9.576	-9.575	0.002	(0)	
	CdOH+	6.589e-11	5.806e-11	-10.181	-10.236	-0.055	(0)	
	CdOHC1	1.645e-11	1.651e-11	-10.784	-10.782	0.002	(0)	
	Cd (CO3) 2-2	1.563e-11	9.419e-12	-10.806	-11.026	-0.220	(0)	
	CdNO3+	1.101e-11	9.699e-12	-10.958	-11.013	-0.055	17.64	
	CdF+	9.674e-12	8.524e-12	-11.014	-11.069	-0.055	(0)	
	CdCl2	3.841e-12	3.855e-12	-11.416	-11.414	0.002	23.14	
	Cd (OH) 2	8.402e-14	8.433e-14	-13.076	-13.074	0.002	(0)	
	CdCl3-	1.552e-15	1.367e-15	-14.809	-14.864	-0.055	70.13	
	CdF2	4.824e-16	4.842e-16	-15.317	-15.315	0.002	(0)	
	Cd2OH+3	2.693e-17	8.622e-18	-16.570	-17.064	-0.495	(0)	
	Cd (OH) 3-	2.696e-19	2.376e-19	-18.569	-18.624	-0.055	(0)	
	Cd (OH) 4-2	8.820e-26	5.317e-26	-25.055	-25.274	-0.220	(0)	
Cl	6.493e-04							
	Cl-	6.491e-04	5.707e-04	-3.188	-3.244	-0.056	18.13	
	FeCl+	1.044e-07	9.203e-08	-6.981	-7.036	-0.055	(0)	
	MnCl+	2.480e-08	2.192e-08	-7.606	-7.659	-0.054	-3.27	
	CuCl2-	2.050e-08	1.804e-08	-7.688	-7.744	-0.055	(0)	
	CdCl+	1.846e-09	1.627e-09	-8.734	-8.789	-0.055	5.75	
	PbCl+	6.251e-11	5.508e-11	-10.204	-10.259	-0.055	7.98	
	ZnCl+	4.142e-11	3.645e-11	-10.383	-10.438	-0.055	-14.88	
	CuCl3-2	2.662e-11	1.625e-11	-10.575	-10.789	-0.214	(0)	
	CdOHC1	1.645e-11	1.651e-11	-10.784	-10.782	0.002	(0)	
	ZnOHC1	1.173e-11	1.177e-11	-10.931	-10.929	0.002	(0)	
	MnCl2	5.442e-12	5.462e-12	-11.264	-11.263	0.002	87.13	
	CdCl2	3.841e-12	3.855e-12	-11.416	-11.414	0.002	23.14	
	PbCl2	5.058e-14	5.076e-14	-13.296	-13.294	0.002	34.89	
	ZnCl2	2.161e-14	2.170e-14	-13.665	-13.664	0.002	104.01	
	CdCl3-	1.552e-15	1.367e-15	-14.809	-14.864	-0.055	70.13	
	MnCl3-	9.712e-16	8.585e-16	-15.013	-15.066	-0.054	43.51	
	PbCl3-	2.596e-17	2.287e-17	-16.586	-16.641	-0.055	65.92	
	ZnCl3-	1.569e-17	1.381e-17	-16.804	-16.860	-0.055	16.86	
	CuCl+	4.436e-20	3.904e-20	-19.353	-19.408	-0.055	0.99	
	PbCl4-2	1.028e-20	6.199e-21	-19.988	-20.208	-0.220	101.54	
	ZnCl4-2	6.417e-21	3.918e-21	-20.193	-20.407	-0.214	145.44	
	CuCl2	1.179e-23	1.184e-23	-22.928	-22.927	0.002	29.84	
	FeCl+2	2.293e-26	1.400e-26	-25.640	-25.854	-0.214	(0)	
	FeCl2+	4.169e-29	3.685e-29	-28.380	-28.434	-0.054	(0)	
	CuCl3-	2.675e-29	2.354e-29	-28.573	-28.628	-0.055	(0)	
	FeCl3	2.095e-33	2.103e-33	-32.679	-32.677	0.002	(0)	
	CuCl4-2	1.078e-34	6.580e-35	-33.968	-34.182	-0.214	(0)	
Cu (1)	2.205e-07							
	Cu+	2.000e-07	1.747e-07	-6.699	-6.758	-0.059	(0)	
	CuCl2-	2.050e-08	1.804e-08	-7.688	-7.744	-0.055	(0)	
	CuCl3-2	2.662e-11	1.625e-11	-10.575	-10.789	-0.214	(0)	
Cu (2)	2.184e-15							
	CuCO3	1.598e-15	1.604e-15	-14.796	-14.795	0.002	(0)	
	Cu (OH) 2	3.503e-16	3.516e-16	-15.456	-15.454	0.002	(0)	
	CuHCO3+	1.472e-16	1.297e-16	-15.832	-15.887	-0.055	(0)	
	Cu+2	4.300e-17	2.670e-17	-16.366	-16.574	-0.207	-26.32	
	Cu (CO3) 2-2	3.749e-17	2.260e-17	-16.426	-16.646	-0.220	(0)	

	NH4+	5.298e-03	4.629e-03	-2.276	-2.335	-0.059	18.01
	NH3	6.150e-05	6.173e-05	-4.211	-4.210	0.002	24.38
N (3)	3.501e-06						
	NO2-	3.501e-06	3.067e-06	-5.456	-5.513	-0.058	25.00
N (5)	1.429e-04						
	NO3-	1.429e-04	1.252e-04	-3.845	-3.902	-0.058	29.48
	CdNO3+	1.101e-11	9.699e-12	-10.958	-11.013	-0.055	17.64
	PbNO3+	5.223e-12	4.602e-12	-11.282	-11.337	-0.055	(0)
	Mn (NO3) 2	5.875e-13	5.897e-13	-12.231	-12.229	0.002	41.31
Na	8.272e-04						
	Na+	8.230e-04	7.268e-04	-3.085	-3.139	-0.054	-1.39
	NaHCO3	3.970e-06	3.985e-06	-5.401	-5.400	0.002	1.80
	NaCO3-	1.634e-07	1.440e-07	-6.787	-6.842	-0.055	-0.96
	NaF	9.422e-09	9.457e-09	-8.026	-8.024	0.002	7.22
	NaHPO4-	1.271e-09	1.125e-09	-8.896	-8.949	-0.053	34.65
	NaOH	1.705e-20	1.711e-20	-19.768	-19.767	0.002	(0)
O (0)	0.000e+00						
	O2	0.000e+00	0.000e+00	-85.214	-85.213	0.002	30.32
P	3.231e-06						
	HPO4-2	1.300e-06	7.940e-07	-5.886	-6.100	-0.214	7.10
	CaHPO4	6.734e-07	6.760e-07	-6.172	-6.170	0.002	(0)
	H2PO4-	5.782e-07	5.120e-07	-6.238	-6.291	-0.053	33.34
	FeHPO4	3.679e-07	3.693e-07	-6.434	-6.433	0.002	(0)
	MgHPO4	1.892e-07	1.899e-07	-6.723	-6.721	0.002	(0)
	CaPO4-	4.452e-08	3.942e-08	-7.351	-7.404	-0.053	(0)
	FeH2PO4+	3.385e-08	2.998e-08	-7.470	-7.523	-0.053	(0)
	CaH2PO4+	2.296e-08	2.033e-08	-7.639	-7.692	-0.053	(0)
	MgPO4-	1.248e-08	1.105e-08	-7.904	-7.957	-0.053	(0)
	MgH2PO4+	6.076e-09	5.380e-09	-8.216	-8.269	-0.053	(0)
	NaHPO4-	1.271e-09	1.125e-09	-8.896	-8.949	-0.053	34.65
	KHPO4-	1.101e-09	9.748e-10	-8.958	-9.011	-0.053	38.29
	PO4-3	2.782e-11	8.813e-12	-10.556	-11.055	-0.499	-22.36
	H3PO4	2.954e-12	2.965e-12	-11.530	-11.528	0.002	47.35
	FeHPO4+	1.963e-25	1.735e-25	-24.707	-24.761	-0.054	(0)
	FeH2PO4+2	1.880e-25	1.156e-25	-24.726	-24.937	-0.211	(0)
Pb	5.314e-07						
	PbCO3	4.815e-07	4.833e-07	-6.317	-6.316	0.002	(0)
	Pb (CO3) 2-2	2.254e-08	1.359e-08	-7.647	-7.867	-0.220	(0)
	PbHCO3+	2.172e-08	1.914e-08	-7.663	-7.718	-0.055	(0)
	Pb+2	4.123e-09	2.486e-09	-8.385	-8.605	-0.220	-15.25
	PbOH+	1.381e-09	1.217e-09	-8.860	-8.915	-0.055	(0)
	PbCl+	6.251e-11	5.508e-11	-10.204	-10.259	-0.055	7.98
	Pb (OH) 2	1.184e-11	1.189e-11	-10.927	-10.925	0.002	(0)
	PbNO3+	5.223e-12	4.602e-12	-11.282	-11.337	-0.055	(0)
	PbF+	1.134e-12	9.994e-13	-11.945	-12.000	-0.055	(0)
	PbCl2	5.058e-14	5.076e-14	-13.296	-13.294	0.002	34.89
	Pb (OH) 3-	3.889e-15	3.427e-15	-14.410	-14.465	-0.055	(0)
	PbF2	4.597e-16	4.614e-16	-15.338	-15.336	0.002	(0)
	Pb2OH+3	2.115e-16	6.771e-17	-15.675	-16.169	-0.495	(0)
	PbCl3-	2.596e-17	2.287e-17	-16.586	-16.641	-0.055	65.92
	Pb (OH) 4-2	3.270e-19	1.971e-19	-18.485	-18.705	-0.220	(0)
	PbF3-	8.577e-20	7.558e-20	-19.067	-19.122	-0.055	(0)
	Pb3 (OH) 4+2	1.148e-20	6.921e-21	-19.940	-20.160	-0.220	(0)
	PbCl4-2	1.028e-20	6.199e-21	-19.988	-20.208	-0.220	101.54
	PbF4-2	1.357e-24	8.179e-25	-23.867	-24.087	-0.220	(0)
Si	9.995e-05						
	H4SiO4	9.954e-05	9.991e-05	-4.002	-4.000	0.002	52.16
	H3SiO4-	4.060e-07	3.573e-07	-6.391	-6.447	-0.055	28.04
	H2SiO4-2	9.302e-13	5.718e-13	-12.031	-12.243	-0.211	(0)
	SiF6-2	9.133e-32	5.577e-32	-31.039	-31.254	-0.214	42.87
Zn	1.531e-07						
	ZnCO3	5.517e-08	5.538e-08	-7.258	-7.257	0.002	(0)
	Zn+2	4.062e-08	2.480e-08	-7.391	-7.605	-0.214	-25.01
	ZnHCO3+	3.436e-08	3.027e-08	-7.464	-7.519	-0.055	(0)
	Zn (CO3) 2-2	2.198e-08	1.325e-08	-7.658	-7.878	-0.220	(0)
	ZnOH+	7.182e-10	6.328e-10	-9.144	-9.199	-0.055	(0)
	Zn (OH) 2	1.961e-10	1.969e-10	-9.707	-9.706	0.002	(0)
	ZnCl+	4.142e-11	3.645e-11	-10.383	-10.438	-0.055	-14.88
	ZnOHCl	1.173e-11	1.177e-11	-10.931	-10.929	0.002	(0)
	ZnF+	8.878e-12	7.823e-12	-11.052	-11.107	-0.055	(0)
	ZnCl2	2.161e-14	2.170e-14	-13.665	-13.664	0.002	104.01
	Zn (OH) 3-	1.774e-14	1.563e-14	-13.751	-13.806	-0.055	(0)
	ZnCl3-	1.569e-17	1.381e-17	-16.804	-16.860	-0.055	16.86
	Zn (OH) 4-2	1.032e-19	6.221e-20	-18.986	-19.206	-0.220	(0)
	ZnCl4-2	6.417e-21	3.918e-21	-20.193	-20.407	-0.214	145.44

LISÍMETRO 3

-----Description of solution-----	
pH	= 7.700
pe	= -4.000
Specific Conductance (µS/cm, 23°C)	= 4247
Density (g/cm³)	= 0.99952
Volume (L)	= 1.00397
Activity of water	= 0.999
Ionic strength	= 4.592e-02

Mass of water (kg) = 1.000e+00
 Total carbon (mol/kg) = 3.672e-02
 Total CO2 (mol/kg) = 3.672e-02
 Temperature (°C) = 23.00
 Electrical balance (eq) = 4.278e-03
 Percent error, $100 \cdot (\text{Cat} - |\text{An}|) / (\text{Cat} + |\text{An}|)$ = 4.96
 Iterations = 14
 Total H = 1.111549e+02
 Total O = 5.561821e+01

-----Redox couples-----

Redox couple	pe	Eh (volts)
N(-3)/N(3)	4.1508	0.2439
N(-3)/N(5)	5.1615	0.3033
N(3)/N(5)	8.1936	0.4815

-----Distribution of species-----

Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma	mole V cm ³ /mol
OH-	5.310e-07	4.342e-07	-6.275	-6.362	-0.087	-3.97
H+	2.327e-08	1.995e-08	-7.633	-7.700	-0.067	0.00
H2O	5.551e+01	9.985e-01	1.744	-0.001	0.000	18.06
Al	3.717e-07					
Al(OH)4-	3.678e-07	3.040e-07	-6.434	-6.517	-0.083	(0)
Al(OH)3	3.273e-09	3.308e-09	-8.485	-8.480	0.005	(0)
Al(OH)2+	6.246e-10	5.207e-10	-9.204	-9.283	-0.079	(0)
AlF2+	1.966e-11	1.639e-11	-10.706	-10.785	-0.079	(0)
AlF3	6.185e-12	6.251e-12	-11.209	-11.204	0.005	(0)
AlOH+2	3.278e-12	1.584e-12	-11.484	-11.800	-0.316	-27.22
AlF+2	2.253e-12	1.089e-12	-11.647	-11.963	-0.316	(0)
AlF4-	9.135e-14	7.550e-14	-13.039	-13.122	-0.083	(0)
Al+3	1.447e-14	3.631e-15	-13.840	-14.440	-0.600	-41.28
Ba	2.045e-06					
Ba+2	1.764e-06	8.193e-07	-5.754	-6.087	-0.333	-12.35
BaHCO3+	2.550e-07	2.108e-07	-6.594	-6.676	-0.083	(0)
BaCO3	2.593e-08	2.621e-08	-7.586	-7.582	0.005	-10.72
BaOH+	1.673e-12	1.389e-12	-11.777	-11.857	-0.081	(0)
C(4)	3.672e-02					
HCO3-	3.428e-02	2.858e-02	-1.465	-1.544	-0.079	24.81
CO2	1.304e-03	1.318e-03	-2.885	-2.880	0.005	29.58
CaHCO3+	2.931e-04	2.457e-04	-3.533	-3.610	-0.077	9.71
MgHCO3+	2.209e-04	1.816e-04	-3.656	-3.741	-0.085	5.55
FeHCO3+	1.815e-04	1.500e-04	-3.741	-3.824	-0.083	(0)
CO3-2	1.334e-04	6.445e-05	-3.875	-4.191	-0.316	-4.73
NaHCO3	1.079e-04	1.091e-04	-3.967	-3.962	0.005	1.80
FeCO3	8.030e-05	8.115e-05	-4.095	-4.091	0.005	(0)
CaCO3	7.169e-05	7.245e-05	-4.145	-4.140	0.005	-14.61
MgCO3	3.233e-05	3.267e-05	-4.490	-4.486	0.005	-17.09
NaCO3-	8.803e-06	7.277e-06	-5.055	-5.138	-0.083	-0.84
MnCO3	2.725e-06	2.754e-06	-5.565	-5.560	0.005	(0)
MnHCO3+	1.649e-06	1.370e-06	-5.783	-5.863	-0.081	(0)
SrHCO3+	6.188e-07	5.159e-07	-6.208	-6.287	-0.079	(0)
BaHCO3+	2.550e-07	2.108e-07	-6.594	-6.676	-0.083	(0)
SrCO3	4.850e-08	4.901e-08	-7.314	-7.310	0.005	-14.14
BaCO3	2.593e-08	2.621e-08	-7.586	-7.582	0.005	-10.72
CdHCO3+	2.008e-08	1.660e-08	-7.697	-7.780	-0.083	(0)
Zn(CO3)2-2	1.017e-08	4.749e-09	-7.993	-8.323	-0.331	(0)
ZnCO3	3.410e-09	3.447e-09	-8.467	-8.463	0.005	(0)
ZnHCO3+	1.167e-09	9.643e-10	-8.933	-9.016	-0.083	(0)
CdCO3	9.305e-10	9.404e-10	-9.031	-9.027	0.005	(0)
Cd(CO3)2-2	4.105e-10	1.917e-10	-9.387	-9.717	-0.331	(0)
CuCO3	4.053e-13	4.096e-13	-12.392	-12.388	0.005	(0)
Cu(CO3)2-2	7.118e-14	3.323e-14	-13.148	-13.478	-0.331	(0)
CuHCO3+	2.051e-14	1.695e-14	-13.688	-13.771	-0.083	(0)
Ca	1.802e-03					
Ca+2	1.436e-03	6.955e-04	-2.843	-3.158	-0.315	-17.67
CaHCO3+	2.931e-04	2.457e-04	-3.533	-3.610	-0.077	9.71
CaCO3	7.169e-05	7.245e-05	-4.145	-4.140	0.005	-14.61
CaHPO4	9.805e-07	9.909e-07	-6.009	-6.004	0.005	(0)
CaPO4-	1.357e-07	1.131e-07	-6.868	-6.946	-0.079	(0)
CaH2PO4+	1.800e-08	1.501e-08	-7.745	-7.824	-0.079	(0)
CaOH+	6.988e-09	5.777e-09	-8.156	-8.238	-0.083	(0)
Cd	7.138e-08					
Cd+2	3.934e-08	1.837e-08	-7.405	-7.736	-0.331	-18.37
CdHCO3+	2.008e-08	1.660e-08	-7.697	-7.780	-0.083	(0)
CdCl+	1.017e-08	8.410e-09	-7.993	-8.075	-0.083	5.76
CdCO3	9.305e-10	9.404e-10	-9.031	-9.027	0.005	(0)
Cd(CO3)2-2	4.105e-10	1.917e-10	-9.387	-9.717	-0.331	(0)
CdCl2	1.662e-10	1.680e-10	-9.779	-9.775	0.005	23.14
CdOHC1	1.648e-10	1.665e-10	-9.783	-9.778	0.005	(0)
CdOH+	7.967e-11	6.585e-11	-10.099	-10.181	-0.083	(0)
CdNO3+	2.413e-11	1.995e-11	-10.617	-10.700	-0.083	17.74
CdF+	8.491e-12	7.019e-12	-11.071	-11.154	-0.083	(0)
CdCl3-	6.004e-13	4.963e-13	-12.222	-12.304	-0.083	70.95
Cd(OH)2	2.033e-13	2.055e-13	-12.692	-12.687	0.005	(0)
CdF2	5.295e-16	5.351e-16	-15.276	-15.272	0.005	(0)
Cd2OH+3	3.372e-17	6.075e-18	-16.472	-17.216	-0.744	(0)

		FeCl ₂ +	1.698e-24	1.411e-24	-23.770	-23.851	-0.081	(0)
		FeCl ₃	6.738e-28	6.809e-28	-27.171	-27.167	0.005	(0)
		Fe ₂ (OH) ₂ +4	1.022e-29	4.855e-31	-28.991	-30.314	-1.323	(0)
		Fe ₃ (OH) ₄ +5	2.822e-38	2.416e-40	-37.549	-39.617	-2.068	(0)
H (0)	5.690e-11							
		H ₂	2.845e-11	2.875e-11	-10.546	-10.541	0.005	28.61
K	5.130e-03							
		K+	5.130e-03	4.201e-03	-2.290	-2.377	-0.087	9.09
		KHPO ₄ -	2.651e-08	2.210e-08	-7.577	-7.656	-0.079	38.48
Mg	1.361e-03							
		Mg+2	1.106e-03	5.477e-04	-2.956	-3.261	-0.305	-21.27
		MgHCO ₃ +	2.209e-04	1.816e-04	-3.656	-3.741	-0.085	5.55
		MgCO ₃	3.233e-05	3.267e-05	-4.490	-4.486	0.005	-17.09
		MgF+	1.281e-06	1.059e-06	-5.892	-5.975	-0.083	-10.45
		MgHPO ₄	1.044e-06	1.055e-06	-5.981	-5.977	0.005	(0)
		MgPO ₄ -	1.441e-07	1.202e-07	-6.841	-6.920	-0.079	(0)
		MgOH+	9.857e-08	8.298e-08	-7.006	-7.081	-0.075	(0)
		MgH ₂ PO ₄ +	1.806e-08	1.506e-08	-7.743	-7.822	-0.079	(0)
Mn (2)	5.477e-06							
		MnCO ₃	2.725e-06	2.754e-06	-5.565	-5.560	0.005	(0)
		MnHCO ₃ +	1.649e-06	1.370e-06	-5.783	-5.863	-0.081	(0)
		Mn+2	1.089e-06	5.379e-07	-5.963	-6.269	-0.306	-18.83
		MnCl+	1.273e-08	1.058e-08	-7.895	-7.976	-0.081	-3.48
		MnOH+	7.069e-10	5.872e-10	-9.151	-9.231	-0.081	(0)
		MnF+	1.360e-10	1.129e-10	-9.867	-9.947	-0.081	(0)
		MnCl ₂	2.205e-11	2.228e-11	-10.657	-10.652	0.005	88.41
		Mn(NO ₃) ₂	3.534e-13	3.571e-13	-12.452	-12.447	0.005	41.58
		MnCl ₃ -	3.566e-14	2.962e-14	-13.448	-13.528	-0.081	43.70
		Mn(OH) ₃ -	1.286e-18	1.068e-18	-17.891	-17.971	-0.081	(0)
Mn (3)	4.935e-36							
		Mn+3	4.935e-36	1.239e-36	-35.307	-35.907	-0.600	(0)
N (-3)	2.657e-02							
		NH ₄ +	2.605e-02	2.105e-02	-1.584	-1.677	-0.093	18.04
		NH ₃	5.159e-04	5.214e-04	-3.287	-3.283	0.005	24.33
N (3)	5.012e-07							
		NO ₂ -	5.012e-07	4.075e-07	-6.300	-6.390	-0.090	25.03
N (5)	5.012e-04							
		NO ₃ -	5.012e-04	4.075e-04	-3.300	-3.390	-0.090	29.47
		CdNO ₃ +	2.413e-11	1.995e-11	-10.617	-10.700	-0.083	17.74
		Mn(NO ₃) ₂	3.534e-13	3.571e-13	-12.452	-12.447	0.005	41.58
Na	8.202e-03							
		Na+	8.085e-03	6.711e-03	-2.092	-2.173	-0.081	-1.33
		NaHCO ₃	1.079e-04	1.091e-04	-3.967	-3.962	0.005	1.80
		NaCO ₃ -	8.803e-06	7.277e-06	-5.055	-5.138	-0.083	-0.84
		NaF	1.160e-07	1.172e-07	-6.936	-6.931	0.005	7.18
		NaHPO ₄ -	4.234e-08	3.530e-08	-7.373	-7.452	-0.079	36.77
		NaOH	2.883e-19	2.914e-19	-18.540	-18.536	0.005	(0)
O (0)	0.000e+00							
		O ₂	0.000e+00	0.000e+00	-71.953	-71.948	0.005	30.24
P	9.714e-06							
		HPO ₄ -2	5.667e-06	2.698e-06	-5.247	-5.569	-0.322	7.45
		H ₂ PO ₄ -	1.052e-06	8.769e-07	-5.978	-6.057	-0.079	33.47
		MgHPO ₄	1.044e-06	1.055e-06	-5.981	-5.977	0.005	(0)
		CaHPO ₄	9.805e-07	9.909e-07	-6.009	-6.004	0.005	(0)
		FeHPO ₄	5.578e-07	5.638e-07	-6.253	-6.249	0.005	(0)
		MgPO ₄ -	1.441e-07	1.202e-07	-6.841	-6.920	-0.079	(0)
		CaPO ₄ -	1.357e-07	1.131e-07	-6.868	-6.946	-0.079	(0)
		NaHPO ₄ -	4.234e-08	3.530e-08	-7.373	-7.452	-0.079	36.77
		FeH ₂ PO ₄ +	2.767e-08	2.307e-08	-7.558	-7.637	-0.079	(0)
		KHPO ₄ -	2.651e-08	2.210e-08	-7.577	-7.656	-0.079	38.48
		MgH ₂ PO ₄ +	1.806e-08	1.506e-08	-7.743	-7.822	-0.079	(0)
		CaH ₂ PO ₄ +	1.800e-08	1.501e-08	-7.745	-7.824	-0.079	(0)
		PO ₄ -3	3.409e-10	5.855e-11	-9.467	-10.232	-0.765	-21.58
		H ₃ PO ₄	2.488e-12	2.515e-12	-11.604	-11.599	0.005	47.30
		FeHPO ₄ +	3.675e-22	3.053e-22	-21.435	-21.515	-0.081	(0)
		FeH ₂ PO ₄ +2	2.192e-22	1.059e-22	-21.659	-21.975	-0.316	(0)
Si	4.006e-04							
		H ₄ SiO ₄	3.973e-04	4.015e-04	-3.401	-3.396	0.005	52.25
		H ₃ SiO ₄ -	3.363e-06	2.765e-06	-5.473	-5.558	-0.085	28.09
		H ₂ SiO ₄ -2	1.710e-11	8.263e-12	-10.767	-11.083	-0.316	(0)
		SiF ₆ -2	1.915e-31	9.117e-32	-30.718	-31.040	-0.322	43.12
Sr	3.262e-06							
		Sr+2	2.595e-06	1.264e-06	-5.586	-5.898	-0.312	-17.28
		SrHCO ₃ +	6.188e-07	5.159e-07	-6.208	-6.287	-0.079	(0)
		SrCO ₃	4.850e-08	4.901e-08	-7.314	-7.310	0.005	-14.14
		SrOH+	3.905e-12	3.243e-12	-11.408	-11.489	-0.081	(0)
Zn	1.534e-08							
		Zn(CO ₃) ₂ -2	1.017e-08	4.749e-09	-7.993	-8.323	-0.331	(0)
		ZnCO ₃	3.410e-09	3.447e-09	-8.467	-8.463	0.005	(0)
		ZnHCO ₃ +	1.167e-09	9.643e-10	-8.933	-9.016	-0.083	(0)
		Zn+2	5.630e-10	2.680e-10	-9.249	-9.572	-0.322	-24.75
		ZnOH+	1.527e-11	1.262e-11	-10.816	-10.899	-0.083	(0)
		Zn(OH) ₂	8.362e-12	8.451e-12	-11.078	-11.073	0.005	(0)
		ZnCl+	3.875e-12	3.186e-12	-11.412	-11.497	-0.085	-15.95
		ZnOHC1	2.121e-12	2.144e-12	-11.673	-11.669	0.005	(0)
		ZnF+	1.355e-13	1.120e-13	-12.868	-12.951	-0.083	(0)
		ZnCl ₂	1.581e-14	1.597e-14	-13.801	-13.797	0.005	106.04
		Zn(OH) ₃ -	1.618e-15	1.337e-15	-14.791	-14.874	-0.083	(0)

ZnCl3-	1.039e-16	8.547e-17	-15.983	-16.068	-0.085	16.60
ZnCl4-2	4.274e-19	2.035e-19	-18.369	-18.691	-0.322	145.71
Zn(OH)4-2	2.272e-20	1.061e-20	-19.644	-19.974	-0.331	(0)

LISÍMETRO 4

-----Description of solution-----						
	pH	=	8.200			
	pe	=	-3.600			
	Specific Conductance (µS/cm, 23°C)	=	6894			
	Density (g/cm³)	=	1.00042			
	Volume (L)	=	1.00486			
	Activity of water	=	0.998			
	Ionic strength	=	7.090e-02			
	Mass of water (kg)	=	1.000e+00			
	Total carbon (mol/kg)	=	4.873e-02			
	Total CO2 (mol/kg)	=	4.873e-02			
	Temperature (°C)	=	23.00			
	Electrical balance (eq)	=	1.136e-02			
	Percent error, 100*(Cat- An)/(Cat+ An)	=	8.24			
	Iterations	=	9			
	Total H	=	1.112455e+02			
	Total O	=	5.565743e+01			

-----Redox couples-----			
Redox couple	pe	Eh (volts)	
N(-3)/N(3)	3.4465	0.2025	
N(-3)/N(5)	4.5596	0.2679	
N(3)/N(5)	7.8989	0.4641	

-----Distribution of species-----						
Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma	mole V cm³/mol
OH-	1.742e-06	1.372e-06	-5.759	-5.863	-0.104	-3.89
H+	7.512e-09	6.310e-09	-8.124	-8.200	-0.076	0.00
H2O	5.551e+01	9.976e-01	1.744	-0.001	0.000	18.06
Al	3.723e-06					
Al(OH)4-	3.713e-06	2.969e-06	-5.430	-5.527	-0.097	(0)
Al(OH)3	1.006e-08	1.023e-08	-7.997	-7.990	0.007	(0)
Al(OH)2+	6.296e-10	5.095e-10	-9.201	-9.293	-0.092	(0)
AlF2+	2.624e-12	2.123e-12	-11.581	-11.673	-0.092	(0)
AlOH+2	1.144e-12	4.905e-13	-11.942	-12.309	-0.368	-27.13
AlF3	9.157e-13	9.308e-13	-12.038	-12.031	0.007	(0)
AlF+2	2.862e-13	1.227e-13	-12.543	-12.911	-0.368	(0)
AlF4-	1.616e-14	1.292e-14	-13.792	-13.889	-0.097	(0)
Al+3	1.711e-15	3.559e-16	-14.767	-15.449	-0.682	-41.12
Ba	2.926e-06					
Ba+2	2.387e-06	9.717e-07	-5.622	-6.012	-0.390	-12.23
BaHCO3+	4.116e-07	3.299e-07	-6.386	-6.482	-0.096	(0)
BaCO3	1.276e-07	1.297e-07	-6.894	-6.887	0.007	-10.72
BaOH+	6.467e-12	5.206e-12	-11.189	-11.284	-0.094	(0)
C(4)	4.873e-02					
HCO3-	4.661e-02	3.772e-02	-1.331	-1.423	-0.092	24.91
CO3-2	6.274e-04	2.690e-04	-3.202	-3.570	-0.368	-4.53
CO2	5.415e-04	5.504e-04	-3.266	-3.259	0.007	29.58
NaHCO3	2.945e-04	2.994e-04	-3.531	-3.524	0.007	1.80
MgHCO3+	1.793e-04	1.423e-04	-3.747	-3.847	-0.100	5.57
CaHCO3+	1.554e-04	1.267e-04	-3.808	-3.897	-0.089	9.73
CaCO3	1.162e-04	1.181e-04	-3.935	-3.928	0.007	-14.61
MgCO3	7.963e-05	8.094e-05	-4.099	-4.092	0.007	-17.09
NaCO3-	7.878e-05	6.314e-05	-4.104	-4.200	-0.096	-0.68
FeCO3	2.555e-05	2.597e-05	-4.593	-4.586	0.007	(0)
FeHCO3+	1.894e-05	1.518e-05	-4.723	-4.819	-0.096	(0)
MnCO3	1.397e-06	1.420e-06	-5.855	-5.848	0.007	(0)
SrHCO3+	5.760e-07	4.661e-07	-6.240	-6.332	-0.092	(0)
BaHCO3+	4.116e-07	3.299e-07	-6.386	-6.482	-0.096	(0)
MnHCO3+	2.775e-07	2.234e-07	-6.557	-6.651	-0.094	(0)
SrCO3	1.377e-07	1.400e-07	-6.861	-6.854	0.007	-14.14
BaCO3	1.276e-07	1.297e-07	-6.894	-6.887	0.007	-10.72
Zn(CO3)2-2	4.259e-08	1.758e-08	-7.371	-7.755	-0.384	(0)
CdHCO3+	2.886e-08	2.313e-08	-7.540	-7.636	-0.096	(0)
Cd(CO3)2-2	8.539e-09	3.525e-09	-8.069	-8.453	-0.384	(0)
CdCO3	4.077e-09	4.144e-09	-8.390	-8.383	0.007	(0)
ZnCO3	3.008e-09	3.057e-09	-8.522	-8.515	0.007	(0)
ZnHCO3+	3.375e-10	2.705e-10	-9.472	-9.568	-0.096	(0)
CuCO3	1.070e-12	1.087e-12	-11.971	-11.964	0.007	(0)
Cu(CO3)2-2	8.920e-13	3.682e-13	-12.050	-12.434	-0.384	(0)
CuHCO3+	1.775e-14	1.423e-14	-13.751	-13.847	-0.096	(0)
Ca	9.024e-04					
Ca+2	6.299e-04	2.718e-04	-3.201	-3.566	-0.365	-17.56
CaHCO3+	1.554e-04	1.267e-04	-3.808	-3.897	-0.089	9.73
CaCO3	1.162e-04	1.181e-04	-3.935	-3.928	0.007	-14.61
CaHPO4	5.877e-07	5.974e-07	-6.231	-6.224	0.007	(0)
CaPO4-	2.665e-07	2.157e-07	-6.574	-6.666	-0.092	(0)
CaOH+	8.897e-09	7.131e-09	-8.051	-8.147	-0.096	(0)

Cd	CdH2PO4+	3.537e-09	2.862e-09	-8.451	-8.543	-0.092	(0)
	1.162e-07						
	Cd+2	4.698e-08	1.939e-08	-7.328	-7.712	-0.384	-18.27
	CdHCO3+	2.886e-08	2.313e-08	-7.540	-7.636	-0.096	(0)
	CdCl+	2.523e-08	2.022e-08	-7.598	-7.694	-0.096	5.97
	Cd(CO3)2-2	8.539e-09	3.525e-09	-8.069	-8.453	-0.384	(0)
	CdCO3	4.077e-09	4.144e-09	-8.390	-8.383	0.007	(0)
	CdOHC1	1.245e-09	1.265e-09	-8.905	-8.898	0.007	(0)
	CdCl2	9.046e-10	9.195e-10	-9.044	-9.036	0.007	23.14
	CdOH+	2.741e-10	2.197e-10	-9.562	-9.658	-0.096	(0)
	CdNO3+	6.504e-11	5.214e-11	-10.187	-10.283	-0.096	17.79
	CdF+	1.063e-11	8.519e-12	-10.974	-11.070	-0.096	(0)
	CdCl3-	7.717e-12	6.186e-12	-11.113	-11.209	-0.096	71.00
	Cd(OH)2	2.131e-12	2.166e-12	-11.671	-11.664	0.007	(0)
	CdF2	7.346e-16	7.466e-16	-15.134	-15.127	0.007	(0)
	Cd2OH+3	1.567e-16	2.140e-17	-15.805	-16.670	-0.865	(0)
	Cd(OH)3-	4.793e-17	3.842e-17	-16.319	-16.415	-0.096	(0)
	Cd(OH)4-2	1.312e-22	5.414e-23	-21.882	-22.266	-0.384	(0)
Cl	1.389e-02						
	Cl-	1.389e-02	1.099e-02	-1.857	-1.959	-0.102	18.23
	FeCl+	7.618e-08	6.106e-08	-7.118	-7.214	-0.096	(0)
	CuCl2-	7.462e-08	5.923e-08	-7.127	-7.227	-0.100	(0)
	CdCl+	2.523e-08	2.022e-08	-7.598	-7.694	-0.096	5.97
	MnCl+	3.695e-09	2.975e-09	-8.432	-8.527	-0.094	-3.46
	CuCl3-2	2.437e-09	1.024e-09	-8.613	-8.990	-0.377	(0)
	CdOHC1	1.245e-09	1.265e-09	-8.905	-8.898	0.007	(0)
	CdCl2	9.046e-10	9.195e-10	-9.044	-9.036	0.007	23.14
	MnCl2	1.404e-11	1.427e-11	-10.853	-10.846	0.007	88.41
	CdCl3-	7.717e-12	6.186e-12	-11.113	-11.209	-0.096	71.00
	ZnOHC1	3.224e-12	3.278e-12	-11.492	-11.484	0.007	(0)
	ZnCl+	1.942e-12	1.542e-12	-11.712	-11.812	-0.100	-16.01
	MnCl3-	5.366e-14	4.320e-14	-13.270	-13.365	-0.094	43.81
	ZnCl2	1.732e-14	1.760e-14	-13.762	-13.754	0.007	106.04
	ZnCl3-	2.701e-16	2.144e-16	-15.568	-15.669	-0.100	16.46
	CuCl+	2.542e-17	2.017e-17	-16.595	-16.695	-0.100	1.41
	ZnCl4-2	2.768e-18	1.162e-18	-17.558	-17.935	-0.377	145.98
	CuCl2	1.146e-19	1.165e-19	-18.941	-18.934	0.007	28.64
	FeCl+2	6.410e-23	2.692e-23	-22.193	-22.570	-0.377	(0)
	CuCl3-	5.523e-24	4.384e-24	-23.258	-23.358	-0.100	(0)
	FeCl2+	1.750e-24	1.409e-24	-23.757	-23.851	-0.094	(0)
	FeCl3	1.523e-27	1.548e-27	-26.817	-26.810	0.007	(0)
	CuCl4-2	5.488e-28	2.305e-28	-27.261	-27.637	-0.377	(0)
Cu (1)	7.905e-08						
	CuCl2-	7.462e-08	5.923e-08	-7.127	-7.227	-0.100	(0)
	CuCl3-2	2.437e-09	1.024e-09	-8.613	-8.990	-0.377	(0)
	Cu+	1.993e-09	1.543e-09	-8.700	-8.812	-0.111	(0)
Cu (2)	2.369e-12						
	CuCO3	1.070e-12	1.087e-12	-11.971	-11.964	0.007	(0)
	Cu(CO3)2-2	8.920e-13	3.682e-13	-12.050	-12.434	-0.384	(0)
	Cu(OH)2	3.868e-13	3.931e-13	-12.413	-12.405	0.007	(0)
	CuHCO3+	1.775e-14	1.423e-14	-13.751	-13.847	-0.096	(0)
	Cu+2	1.705e-15	7.527e-16	-14.768	-15.123	-0.355	-26.03
	CuOH+	1.499e-15	1.190e-15	-14.824	-14.924	-0.100	(0)
	CuCl+	2.542e-17	2.017e-17	-16.595	-16.695	-0.100	1.41
	Cu(OH)3-	4.673e-18	3.746e-18	-17.330	-17.426	-0.096	(0)
	CuF+	5.853e-19	4.692e-19	-18.233	-18.329	-0.096	(0)
	CuCl2	1.146e-19	1.165e-19	-18.941	-18.934	0.007	28.64
	Cu(OH)4-2	2.863e-22	1.182e-22	-21.543	-21.928	-0.384	(0)
	CuCl3-	5.523e-24	4.384e-24	-23.258	-23.358	-0.100	(0)
	Cu2(OH)2+2	1.229e-24	5.075e-25	-23.910	-24.295	-0.384	(0)
	CuCl4-2	5.488e-28	2.305e-28	-27.261	-27.637	-0.377	(0)
F	4.548e-05						
	F-	4.430e-05	3.489e-05	-4.354	-4.457	-0.104	-1.12
	MgF+	9.039e-07	7.227e-07	-6.044	-6.141	-0.097	-10.42
	NaF	2.756e-07	2.802e-07	-6.560	-6.553	0.007	7.18
	FeF+	1.752e-09	1.404e-09	-8.756	-8.853	-0.096	(0)
	HF	3.134e-10	3.185e-10	-9.504	-9.497	0.007	12.41
	MnF+	1.992e-11	1.604e-11	-10.701	-10.795	-0.094	(0)
	CdF+	1.063e-11	8.519e-12	-10.974	-11.070	-0.096	(0)
	AlF2+	2.624e-12	2.123e-12	-11.581	-11.673	-0.092	(0)
	AlF3	9.157e-13	9.308e-13	-12.038	-12.031	0.007	(0)
	AlF+2	2.862e-13	1.227e-13	-12.543	-12.911	-0.368	(0)
	HF2-	5.236e-14	4.197e-14	-13.281	-13.377	-0.096	22.18
	ZnF+	3.415e-14	2.737e-14	-13.467	-13.563	-0.096	(0)
	AlF4-	1.616e-14	1.292e-14	-13.792	-13.889	-0.097	(0)
	CdF2	7.346e-16	7.466e-16	-15.134	-15.127	0.007	(0)
	CuF+	5.853e-19	4.692e-19	-18.233	-18.329	-0.096	(0)
	FeF+2	1.104e-20	4.636e-21	-19.957	-20.334	-0.377	(0)
	FeF2+	7.811e-21	6.288e-21	-20.107	-20.201	-0.094	(0)
	FeF3	3.398e-22	3.453e-22	-21.469	-21.462	0.007	(0)
	SiF6-2	4.969e-33	2.087e-33	-32.304	-32.680	-0.377	43.32
Fe (2)	5.397e-05						
	FeCO3	2.555e-05	2.597e-05	-4.593	-4.586	0.007	(0)
	FeHCO3+	1.894e-05	1.518e-05	-4.723	-4.819	-0.096	(0)
	Fe+2	9.118e-06	4.025e-06	-5.040	-5.395	-0.355	-21.69
	FeOH+	2.151e-07	1.731e-07	-6.667	-6.762	-0.094	(0)
	FeCl+	7.618e-08	6.106e-08	-7.118	-7.214	-0.096	(0)
	FeHPO4	6.563e-08	6.671e-08	-7.183	-7.176	0.007	(0)

FeF+	1.752e-09	1.404e-09	-8.756	-8.853	-0.096	(0)
FeH2PO4+	1.067e-09	8.631e-10	-8.972	-9.064	-0.092	(0)
Fe (OH) 2	1.924e-10	1.956e-10	-9.716	-9.709	0.007	(0)
Fe (OH) 3-	1.399e-12	1.126e-12	-11.854	-11.948	-0.094	(0)
Fe (3)	8.616e-11					
Fe (OH) 3	6.980e-11	7.095e-11	-10.156	-10.149	0.007	(0)
Fe (OH) 4-	1.166e-11	9.436e-12	-10.933	-11.025	-0.092	(0)
Fe (OH) 2+	4.700e-12	3.803e-12	-11.328	-11.420	-0.092	(0)
FeOH+2	1.867e-16	7.840e-17	-15.729	-16.106	-0.377	(0)
FeF+2	1.104e-20	4.636e-21	-19.957	-20.334	-0.377	(0)
FeF2+	7.811e-21	6.288e-21	-20.107	-20.201	-0.094	(0)
Fe+3	4.156e-22	8.646e-23	-21.381	-22.063	-0.682	(0)
FeF3	3.398e-22	3.453e-22	-21.469	-21.462	0.007	(0)
FeHPO4+	1.127e-22	9.073e-23	-21.948	-22.042	-0.094	(0)
FeCl+2	6.410e-23	2.692e-23	-22.193	-22.570	-0.377	(0)
FeH2PO4+2	2.322e-23	9.958e-24	-22.634	-23.002	-0.368	(0)
FeCl2+	1.750e-24	1.409e-24	-23.757	-23.851	-0.094	(0)
FeCl3	1.523e-27	1.548e-27	-26.817	-26.810	0.007	(0)
Fe2 (OH) 2+4	6.193e-30	1.798e-31	-29.208	-30.745	-1.537	(0)
Fe3 (OH) 4+5	4.338e-38	1.720e-40	-37.363	-39.764	-2.402	(0)
H (0)	8.967e-13					
H2	4.484e-13	4.557e-13	-12.348	-12.341	0.007	28.61
K	1.007e-02					
K+	1.007e-02	7.953e-03	-1.997	-2.099	-0.103	9.13
KHPO4-	7.978e-08	6.456e-08	-7.098	-7.190	-0.092	38.55
Mg	9.918e-04					
Mg+2	7.304e-04	3.252e-04	-3.136	-3.488	-0.351	-21.16
MgHCO3+	1.793e-04	1.423e-04	-3.747	-3.847	-0.100	5.57
MgCO3	7.963e-05	8.094e-05	-4.099	-4.092	0.007	-17.09
MgHPO4	9.508e-07	9.665e-07	-6.022	-6.015	0.007	(0)
MgF+	9.039e-07	7.227e-07	-6.044	-6.141	-0.097	-10.42
MgPO4-	4.302e-07	3.481e-07	-6.366	-6.458	-0.092	(0)
MgOH+	1.899e-07	1.556e-07	-6.722	-6.808	-0.086	(0)
MgH2PO4+	5.389e-09	4.361e-09	-8.268	-8.360	-0.092	(0)
Mn (2)	1.829e-06					
MnCO3	1.397e-06	1.420e-06	-5.855	-5.848	0.007	(0)
MnHCO3+	2.775e-07	2.234e-07	-6.557	-6.651	-0.094	(0)
Mn+2	1.505e-07	6.644e-08	-6.822	-7.178	-0.355	-18.49
MnCl+	3.695e-09	2.975e-09	-8.432	-8.527	-0.094	-3.46
MnOH+	2.847e-10	2.292e-10	-9.546	-9.640	-0.094	(0)
MnF+	1.992e-11	1.604e-11	-10.701	-10.795	-0.094	(0)
MnCl2	1.404e-11	1.427e-11	-10.853	-10.846	0.007	88.41
Mn (NO3) 2	2.659e-13	2.703e-13	-12.575	-12.568	0.007	41.58
MnCl3-	5.366e-14	4.320e-14	-13.270	-13.365	-0.094	43.81
Mn (OH) 3-	5.171e-18	4.163e-18	-17.286	-17.381	-0.094	(0)
Mn (3)	1.848e-36					
Mn+3	1.848e-36	3.844e-37	-35.733	-36.415	-0.682	(0)
N (-3)	4.669e-02					
NH4+	4.406e-02	3.412e-02	-1.356	-1.467	-0.111	18.08
NH3	2.630e-03	2.673e-03	-2.580	-2.573	0.007	24.33
N (3)	5.021e-07					
NO2-	5.021e-07	3.922e-07	-6.299	-6.406	-0.107	25.08
N (5)	1.291e-03					
NO3-	1.291e-03	1.009e-03	-2.889	-2.996	-0.107	29.52
CdNO3+	6.504e-11	5.214e-11	-10.187	-10.283	-0.096	17.79
Mn (NO3) 2	2.659e-13	2.703e-13	-12.575	-12.568	0.007	41.58
Na	1.770e-02					
Na+	1.732e-02	1.395e-02	-1.761	-1.855	-0.094	-1.26
NaHCO3	2.945e-04	2.994e-04	-3.531	-3.524	0.007	1.80
NaCO3-	7.878e-05	6.314e-05	-4.104	-4.200	-0.096	-0.68
NaF	2.756e-07	2.802e-07	-6.560	-6.553	0.007	7.18
NaHPO4-	1.400e-07	1.133e-07	-6.854	-6.946	-0.092	38.52
NaOH	1.883e-18	1.914e-18	-17.725	-17.718	0.007	(0)
O (0)	0.000e+00					
O2	0.000e+00	0.000e+00	-68.356	-68.349	0.007	30.24
P	1.297e-05					
HPO4-2	9.912e-06	4.163e-06	-5.004	-5.381	-0.377	7.64
MgHPO4	9.508e-07	9.665e-07	-6.022	-6.015	0.007	(0)
CaHPO4	5.877e-07	5.974e-07	-6.231	-6.224	0.007	(0)
H2PO4-	5.288e-07	4.279e-07	-6.277	-6.369	-0.092	33.55
MgPO4-	4.302e-07	3.481e-07	-6.366	-6.458	-0.092	(0)
CaPO4-	2.665e-07	2.157e-07	-6.574	-6.666	-0.092	(0)
NaHPO4-	1.400e-07	1.133e-07	-6.854	-6.946	-0.092	38.52
KHPO4-	7.978e-08	6.456e-08	-7.098	-7.190	-0.092	38.55
FeHPO4	6.563e-08	6.671e-08	-7.183	-7.176	0.007	(0)
MgH2PO4+	5.389e-09	4.361e-09	-8.268	-8.360	-0.092	(0)
CaH2PO4+	3.537e-09	2.862e-09	-8.451	-8.543	-0.092	(0)
PO4-3	2.283e-09	2.857e-10	-8.641	-9.544	-0.903	-21.17
FeH2PO4+	1.067e-09	8.631e-10	-8.972	-9.064	-0.092	(0)
H3PO4	3.818e-13	3.881e-13	-12.418	-12.411	0.007	47.30
FeHPO4+	1.127e-22	9.073e-23	-21.948	-22.042	-0.094	(0)
FeH2PO4+2	2.322e-23	9.958e-24	-22.634	-23.002	-0.368	(0)
Si	4.013e-04					
H4SiO4	3.904e-04	3.968e-04	-3.408	-3.401	0.007	52.25
H3SiO4-	1.089e-05	8.643e-06	-4.963	-5.063	-0.100	28.14
H2SiO4-2	1.905e-10	8.167e-11	-9.720	-10.088	-0.368	(0)
SiF6-2	4.969e-33	2.087e-33	-32.304	-32.680	-0.377	43.32
Sr	2.706e-06					

Sr+2	1.992e-06	8.650e-07	-5.701	-6.063	-0.362	-17.18
SrHCO3+	5.760e-07	4.661e-07	-6.240	-6.332	-0.092	(0)
SrCO3	1.377e-07	1.400e-07	-6.861	-6.854	0.007	-14.14
SrOH+	8.713e-12	7.014e-12	-11.060	-11.154	-0.094	(0)
Zn	4.611e-08					
Zn(CO3)2-2	4.259e-08	1.758e-08	-7.371	-7.755	-0.384	(0)
ZnCO3	3.008e-09	3.057e-09	-8.522	-8.515	0.007	(0)
ZnHCO3+	3.375e-10	2.705e-10	-9.472	-9.568	-0.096	(0)
Zn+2	1.356e-10	5.696e-11	-9.868	-10.244	-0.377	-24.65
Zn(OH)2	1.764e-11	1.793e-11	-10.754	-10.746	0.007	(0)
ZnOH+	1.058e-11	8.476e-12	-10.976	-11.072	-0.096	(0)
ZnOHCl	3.224e-12	3.278e-12	-11.492	-11.484	0.007	(0)
ZnCl+	1.942e-12	1.542e-12	-11.712	-11.812	-0.100	-16.01
ZnF+	3.415e-14	2.737e-14	-13.467	-13.563	-0.096	(0)
ZnCl2	1.732e-14	1.760e-14	-13.762	-13.754	0.007	106.04
Zn(OH)3-	1.118e-14	8.964e-15	-13.951	-14.048	-0.096	(0)
ZnCl3-	2.701e-16	2.144e-16	-15.568	-15.669	-0.100	16.46
ZnCl4-2	2.768e-18	1.162e-18	-17.558	-17.935	-0.377	145.98
Zn(OH)4-2	5.442e-19	2.246e-19	-18.264	-18.649	-0.384	(0)

LISÍMETRO 5

-----Description of solution-----						
	pH	=	8.100			
	pe	=	-2.800			
	Specific Conductance (µS/cm, 22°C)	=	7973			
	Density (g/cm³)	=	1.00102			
	Volume (L)	=	1.00490			
	Activity of water	=	0.997			
	Ionic strength	=	8.238e-02			
	Mass of water (kg)	=	1.000e+00			
	Total carbon (mol/kg)	=	4.625e-02			
	Total CO2 (mol/kg)	=	4.625e-02			
	Temperature (°C)	=	22.00			
	Electrical balance (eq)	=	1.596e-02			
	Percent error, 100*(Cat- An)/(Cat+ An)	=	9.94			
	Iterations	=	11			
	Total H	=	1.112610e+02			
	Total O	=	5.566064e+01			

-----Redox couples-----						
	Redox couple	pe	Eh (volts)			
	N(-3)/N(3)	4.2672	0.2499			
	N(-3)/N(5)	4.7819	0.2800			
	N(3)/N(5)	6.3260	0.3705			

-----Distribution of species-----						
Species	Molality	Activity	Log Molality	Log Activity	Log Gamma	mole V cm³/mol
OH-	1.296e-06	1.007e-06	-5.887	-5.997	-0.110	-3.91
H+	9.524e-09	7.943e-09	-8.021	-8.100	-0.079	0.00
H2O	5.551e+01	9.972e-01	1.744	-0.001	0.000	18.06
Al	4.098e-06					
Al(OH)4-	4.082e-06	3.226e-06	-5.389	-5.491	-0.102	(0)
Al(OH)3	1.390e-08	1.416e-08	-7.857	-7.849	0.008	(0)
Al(OH)2+	1.198e-09	9.591e-10	-8.922	-9.018	-0.097	(0)
AlF2+	9.229e-12	7.390e-12	-11.035	-11.131	-0.097	(0)
AlF3	3.189e-12	3.251e-12	-11.496	-11.488	0.008	(0)
AlOH+2	3.096e-12	1.272e-12	-11.509	-11.895	-0.386	-27.06
AlF+2	1.040e-12	4.274e-13	-11.983	-12.369	-0.386	(0)
AlF4-	5.736e-14	4.532e-14	-13.241	-13.344	-0.102	(0)
Al+3	6.362e-15	1.242e-15	-14.196	-14.906	-0.710	-41.00
Ba	3.440e-06					
Ba+2	2.897e-06	1.125e-06	-5.538	-5.949	-0.411	-12.25
BaHCO3+	4.375e-07	3.470e-07	-6.359	-6.460	-0.101	(0)
BaCO3	1.053e-07	1.073e-07	-6.978	-6.969	0.008	-10.73
BaOH+	6.014e-12	4.788e-12	-11.221	-11.320	-0.099	(0)
C(4)	4.625e-02					
HCO3-	4.415e-02	3.535e-02	-1.355	-1.452	-0.097	24.88
CO2	6.463e-04	6.586e-04	-3.190	-3.181	0.008	29.83
CO3-2	4.769e-04	1.960e-04	-3.322	-3.708	-0.386	-4.54
NaHCO3	3.630e-04	3.700e-04	-3.440	-3.432	0.008	1.80
MgHCO3+	2.040e-04	1.599e-04	-3.690	-3.796	-0.106	5.55
CaHCO3+	1.304e-04	1.053e-04	-3.885	-3.978	-0.093	9.70
CaCO3	7.478e-05	7.621e-05	-4.126	-4.118	0.008	-14.61
NaCO3-	7.224e-05	5.730e-05	-4.141	-4.242	-0.101	-0.71
MgCO3	6.859e-05	6.990e-05	-4.164	-4.156	0.008	-17.09
FeCO3	2.996e-05	3.054e-05	-4.523	-4.515	0.008	(0)
FeHCO3+	2.895e-05	2.296e-05	-4.538	-4.639	-0.101	(0)
Zn(CO3)2-2	2.417e-06	9.566e-07	-5.617	-6.019	-0.402	(0)
MnCO3	1.289e-06	1.314e-06	-5.890	-5.881	0.008	(0)
BaHCO3+	4.375e-07	3.470e-07	-6.359	-6.460	-0.101	(0)
SrHCO3+	3.407e-07	2.728e-07	-6.468	-6.564	-0.097	(0)
MnHCO3+	3.340e-07	2.659e-07	-6.476	-6.575	-0.099	(0)
ZnCO3	2.240e-07	2.283e-07	-6.650	-6.641	0.008	(0)
BaCO3	1.053e-07	1.073e-07	-6.978	-6.969	0.008	-10.73

HF2-	6.547e-14	5.193e-14	-13.184	-13.285	-0.101	22.15
AlF4-	5.736e-14	4.532e-14	-13.241	-13.344	-0.102	(0)
CdF2	1.057e-15	1.077e-15	-14.976	-14.968	0.008	(0)
CuF+	4.717e-16	3.741e-16	-15.326	-15.427	-0.101	(0)
FeF+2	1.099e-19	4.417e-20	-18.959	-19.355	-0.396	(0)
FeF2+	7.467e-20	5.944e-20	-19.127	-19.226	-0.099	(0)
FeF3	3.207e-21	3.268e-21	-20.494	-20.486	0.008	(0)
SiF6-2	4.340e-33	1.743e-33	-32.362	-32.759	-0.396	43.32
Fe (2)	7.559e-05					
FeCO3	2.996e-05	3.054e-05	-4.523	-4.515	0.008	(0)
FeHCO3+	2.895e-05	2.296e-05	-4.538	-4.639	-0.101	(0)
Fe+2	1.531e-05	6.496e-06	-4.815	-5.187	-0.372	-21.72
FeHPO4	9.025e-07	9.198e-07	-6.045	-6.036	0.008	(0)
FeOH+	2.583e-07	2.056e-07	-6.588	-6.687	-0.099	(0)
FeCl+	1.824e-07	1.447e-07	-6.739	-6.840	-0.101	(0)
FeH2PO4+	1.882e-08	1.507e-08	-7.725	-7.822	-0.097	(0)
FeF+	2.870e-09	2.277e-09	-8.542	-8.643	-0.101	(0)
Fe (OH) 2	1.657e-10	1.688e-10	-9.781	-9.773	0.008	(0)
Fe (OH) 3-	9.601e-13	7.644e-13	-12.018	-12.117	-0.099	(0)
Fe (3)	3.547e-10					
Fe (OH) 3	2.910e-10	2.966e-10	-9.536	-9.528	0.008	(0)
Fe (OH) 4-	3.755e-11	3.007e-11	-10.425	-10.522	-0.097	(0)
Fe (OH) 2+	2.614e-11	2.093e-11	-10.583	-10.679	-0.097	(0)
FeOH+2	1.406e-15	5.647e-16	-14.852	-15.248	-0.396	(0)
FeF+2	1.099e-19	4.417e-20	-18.959	-19.355	-0.396	(0)
FeF2+	7.467e-20	5.944e-20	-19.127	-19.226	-0.099	(0)
FeHPO4+	9.072e-21	7.222e-21	-20.042	-20.141	-0.099	(0)
Fe+3	4.267e-21	8.328e-22	-20.370	-21.079	-0.710	(0)
FeF3	3.207e-21	3.268e-21	-20.494	-20.486	0.008	(0)
FeH2PO4+2	2.525e-21	1.037e-21	-20.598	-20.984	-0.386	(0)
FeCl+2	9.177e-22	3.686e-22	-21.037	-21.433	-0.396	(0)
FeCl2+	3.674e-23	2.925e-23	-22.435	-22.534	-0.099	(0)
FeCl3	4.631e-26	4.720e-26	-25.334	-25.326	0.008	(0)
Fe2 (OH) 2+4	3.963e-28	9.729e-30	-27.402	-29.012	-1.610	(0)
Fe3 (OH) 4+5	1.844e-35	5.627e-38	-34.734	-37.250	-2.516	(0)
H (0)	3.597e-14					
H2	1.798e-14	1.833e-14	-13.745	-13.737	0.008	28.61
K	1.272e-02					
K+	1.272e-02	9.914e-03	-1.895	-2.004	-0.108	9.11
KHPO4-	8.588e-07	6.876e-07	-6.066	-6.163	-0.097	38.66
Mg	1.199e-03					
Mg+2	9.120e-04	3.914e-04	-3.040	-3.407	-0.367	-21.09
MgHCO3+	2.040e-04	1.599e-04	-3.690	-3.796	-0.106	5.55
MgCO3	6.859e-05	6.990e-05	-4.164	-4.156	0.008	-17.09
MgHPO4	9.569e-06	9.753e-06	-5.019	-5.011	0.008	(0)
MgPO4-	3.419e-06	2.737e-06	-5.466	-5.563	-0.097	(0)
MgF+	1.086e-06	8.580e-07	-5.964	-6.067	-0.102	-10.41
MgOH+	1.671e-07	1.357e-07	-6.777	-6.867	-0.090	(0)
MgH2PO4+	6.955e-08	5.569e-08	-7.158	-7.254	-0.097	(0)
Mn (2)	1.829e-06					
MnCO3	1.289e-06	1.314e-06	-5.890	-5.881	0.008	(0)
MnHCO3+	3.340e-07	2.659e-07	-6.476	-6.575	-0.099	(0)
Mn+2	1.989e-07	8.441e-08	-6.701	-7.074	-0.372	-18.38
MnCl+	6.969e-09	5.548e-09	-8.157	-8.256	-0.099	-3.72
MnOH+	2.673e-10	2.128e-10	-9.573	-9.672	-0.099	(0)
MnCl2	3.835e-11	3.908e-11	-10.416	-10.408	0.008	89.72
MnF+	2.571e-11	2.047e-11	-10.590	-10.689	-0.099	(0)
Mn (NO3) 2	1.703e-12	1.736e-12	-11.769	-11.761	0.008	41.86
MnCl3-	2.182e-13	1.737e-13	-12.661	-12.760	-0.099	43.89
Mn (OH) 3-	3.325e-18	2.647e-18	-17.478	-17.577	-0.099	(0)
Mn (3)	1.361e-35					
Mn+3	1.361e-35	2.656e-36	-34.866	-35.576	-0.710	(0)
N (-3)	5.131e-02					
NH4+	4.918e-02	3.749e-02	-1.308	-1.426	-0.118	18.06
NH3	2.130e-03	2.171e-03	-2.672	-2.663	0.008	24.29
N (3)	3.265e-03					
NO2-	3.265e-03	2.514e-03	-2.486	-2.600	-0.114	25.04
N (5)	2.942e-03					
NO3-	2.942e-03	2.265e-03	-2.531	-2.645	-0.114	29.44
CdNO3+	2.175e-10	1.725e-10	-9.662	-9.763	-0.101	17.84
Mn (NO3) 2	1.703e-12	1.736e-12	-11.769	-11.761	0.008	41.86
Na	2.339e-02					
Na+	2.295e-02	1.830e-02	-1.639	-1.738	-0.098	-1.29
NaHCO3	3.630e-04	3.700e-04	-3.440	-3.432	0.008	1.80
NaCO3-	7.224e-05	5.730e-05	-4.141	-4.242	-0.101	-0.71
NaHPO4-	1.585e-06	1.269e-06	-5.800	-5.897	-0.097	39.27
NaF	3.621e-07	3.690e-07	-6.441	-6.433	0.008	7.14
NaOH	1.808e-18	1.843e-18	-17.743	-17.734	0.008	(0)
O (0)	0.000e+00					
O2	0.000e+00	0.000e+00	-65.895	-65.887	0.008	30.16
P	1.168e-04					
HPO4-2	8.855e-05	3.557e-05	-4.053	-4.449	-0.396	7.74
MgHPO4	9.569e-06	9.753e-06	-5.019	-5.011	0.008	(0)
H2PO4-	5.781e-06	4.628e-06	-5.238	-5.335	-0.097	33.60
CaHPO4	4.431e-06	4.516e-06	-5.354	-5.345	0.008	(0)
MgPO4-	3.419e-06	2.737e-06	-5.466	-5.563	-0.097	(0)
CaPO4-	1.587e-06	1.270e-06	-5.800	-5.896	-0.097	(0)
NaHPO4-	1.585e-06	1.269e-06	-5.800	-5.897	-0.097	39.27

FeHPO4	9.025e-07	9.198e-07	-6.045	-6.036	0.008	(0)
KHPO4-	8.588e-07	6.876e-07	-6.066	-6.163	-0.097	38.66
MgH2PO4+	6.955e-08	5.569e-08	-7.158	-7.254	-0.097	(0)
CaH2PO4+	3.419e-08	2.737e-08	-7.466	-7.563	-0.097	(0)
FeH2PO4+	1.882e-08	1.507e-08	-7.725	-7.822	-0.097	(0)
PO4-3	1.702e-08	1.900e-09	-7.769	-8.721	-0.952	-20.95
H3PO4	5.123e-12	5.221e-12	-11.290	-11.282	0.008	47.24
FeHPO4+	9.072e-21	7.222e-21	-20.042	-20.141	-0.099	(0)
FeH2PO4+2	2.525e-21	1.037e-21	-20.598	-20.984	-0.386	(0)
Si	1.171e-04					
H4SiO4	1.146e-04	1.168e-04	-3.941	-3.933	0.008	52.34
H3SiO4-	2.487e-06	1.949e-06	-5.604	-5.710	-0.106	28.13
H2SiO4-2	3.330e-11	1.368e-11	-10.478	-10.864	-0.386	(0)
SiF6-2	4.340e-33	1.743e-33	-32.362	-32.759	-0.396	43.32
Sr	1.744e-06					
Sr+2	1.340e-06	5.591e-07	-5.873	-6.253	-0.380	-17.13
SrHCO3+	3.407e-07	2.728e-07	-6.468	-6.564	-0.097	(0)
SrCO3	6.281e-08	6.401e-08	-7.202	-7.194	0.008	-14.14
SrOH+	4.522e-12	3.600e-12	-11.345	-11.444	-0.099	(0)
Zn	2.691e-06					
Zn (CO3) 2-2	2.417e-06	9.566e-07	-5.617	-6.019	-0.402	(0)
ZnCO3	2.240e-07	2.283e-07	-6.650	-6.641	0.008	(0)
ZnHCO3+	3.276e-08	2.598e-08	-7.485	-7.585	-0.101	(0)
Zn+2	1.454e-08	5.839e-09	-7.838	-8.234	-0.396	-24.54
Zn (OH) 2	1.137e-09	1.159e-09	-8.944	-8.936	0.008	(0)
ZnOH+	8.052e-10	6.387e-10	-9.094	-9.195	-0.101	(0)
ZnOHCl	3.843e-10	3.917e-10	-9.415	-9.407	0.008	(0)
ZnCl+	2.831e-10	2.219e-10	-9.548	-9.654	-0.106	-17.09
ZnCl2	3.634e-12	3.703e-12	-11.440	-11.431	0.008	108.14
ZnF+	3.508e-12	2.783e-12	-11.455	-11.556	-0.101	(0)
Zn (OH) 3-	5.799e-13	4.600e-13	-12.237	-12.337	-0.101	(0)
ZnCl3-	8.400e-14	6.584e-14	-13.076	-13.182	-0.106	16.28
ZnCl4-2	1.294e-15	5.198e-16	-14.888	-15.284	-0.396	145.93
Zn (OH) 4-2	2.312e-17	9.153e-18	-16.636	-17.038	-0.402	(0)

LISÍMETRO 6

```

-----Description of solution-----
pH = 8.100
pe = -2.900
Specific Conductance (µS/cm, 22°C) = 5849
Density (g/cm³) = 1.00035
Volume (L) = 1.00436
Activity of water = 0.998
Ionic strength = 6.219e-02
Mass of water (kg) = 1.000e+00
Total carbon (mol/kg) = 4.575e-02
Total CO2 (mol/kg) = 4.575e-02
Temperature (°C) = 22.00
Electrical balance (eq) = 2.101e-03
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|) = 1.75
Iterations = 14
Total H = 1.112137e+02
Total O = 5.564835e+01

```

```

-----Redox couples-----
Redox couple      pe  Eh (volts)
N(-3)/N(3)        3.7755  0.2211
N(-3)/N(5)        4.7453  0.2779
N(3)/N(5)         7.6550  0.4483

```

```

-----Distribution of species-----
Species           Molality   Activity   Log Molality   Log Activity   Log Gamma   mole V
                                                         cm³/mol
OH-               1.264e-06   1.008e-06   -5.898         -5.997         -0.098      -3.97
H+               9.395e-09   7.943e-09   -8.027         -8.100         -0.073       0.00
H2O              5.551e+01   9.979e-01   1.744         -0.001         0.000      18.06
Al
Al (OH) 4-       7.815e-06   7.785e-06   6.292e-06     -5.109         -5.201      -0.092      (0)
Al (OH) 3        2.722e-08   2.761e-08   -7.565         -7.559         0.006       (0)
Al (OH) 2+       2.287e-09   1.868e-09   -8.641         -8.729         -0.088      (0)
AlF2+            8.655e-12   7.071e-12   -11.063        -11.151        -0.088      (0)
AlOH+2          5.559e-12   2.477e-12   -11.255        -11.606        -0.351     -27.12
AlF3            2.151e-12   2.182e-12   -11.667        -11.661        0.006       (0)
AlF+2           1.309e-12   5.831e-13   -11.883        -12.234        -0.351      (0)
AlF4-           2.640e-14   2.134e-14   -13.578        -13.671        -0.092      (0)
Al+3            1.094e-14   2.415e-15   -13.961        -14.617        -0.656     -41.11
Ba
Ba+2            3.217e-06   2.672e-06   1.135e-06     -5.573         -5.945      -0.372     -12.33
BaHCO3+         4.368e-07   3.536e-07   -6.360         -6.452         -0.092      (0)
BaCO3           1.078e-07   1.093e-07   -6.968         -6.961         0.006     -10.73
BaOH+           5.942e-12   4.832e-12   -11.226        -11.316        -0.090      (0)
C (4)           4.575e-02
HCO3-           4.371e-02   3.571e-02   -1.359         -1.447         -0.088      24.80
CO2             6.555e-04   6.650e-04   -3.183         -3.177         0.006      29.83
CO3-2           4.444e-04   1.980e-04   -3.352         -3.703         -0.351     -4.69

```


N(-3)	3.914e-02					
NH4+	3.746e-02	2.941e-02	-1.426	-1.531	-0.105	18.03
NH3	1.679e-03	1.703e-03	-2.775	-2.769	0.006	24.29
N(3)	2.796e-06					
NO2-	2.796e-06	2.213e-06	-5.553	-5.655	-0.102	25.00
N(5)	1.147e-03					
NO3-	1.147e-03	9.077e-04	-2.940	-3.042	-0.102	29.40
CdNO3+	4.565e-11	3.695e-11	-10.341	-10.432	-0.092	17.80
PbNO3+	1.192e-12	9.646e-13	-11.924	-12.016	-0.092	(0)
Mn(NO3)2	5.494e-13	5.574e-13	-12.260	-12.254	0.006	41.86
Na	1.232e-02					
Na+	1.208e-02	9.824e-03	-1.918	-2.008	-0.090	-1.34
NaHCO3	1.979e-04	2.007e-04	-3.704	-3.697	0.006	1.80
NaCO3-	3.841e-05	3.109e-05	-4.416	-4.507	-0.092	-0.84
NaF	1.370e-07	1.390e-07	-6.863	-6.857	0.006	7.14
NaHPO4-	1.196e-07	9.774e-08	-6.922	-7.010	-0.088	37.88
NaOH	9.762e-19	9.903e-19	-18.010	-18.004	0.006	(0)
O(0)	0.000e+00					
O2	0.000e+00	0.000e+00	-66.292	-66.286	0.006	30.16
P	1.621e-05					
HPO4-2	1.167e-05	5.103e-06	-4.933	-5.292	-0.359	7.60
MgHPO4	1.369e-06	1.389e-06	-5.864	-5.857	0.006	(0)
CaHPO4	1.147e-06	1.163e-06	-5.941	-5.934	0.006	(0)
H2PO4-	8.127e-07	6.640e-07	-6.090	-6.178	-0.088	33.54
MgPO4-	4.771e-07	3.898e-07	-6.321	-6.409	-0.088	(0)
CaPO4-	4.006e-07	3.273e-07	-6.397	-6.485	-0.088	(0)
FeHPO4	1.205e-07	1.222e-07	-6.919	-6.913	0.006	(0)
NaHPO4-	1.196e-07	9.774e-08	-6.922	-7.010	-0.088	37.88
KHPO4-	7.046e-08	5.757e-08	-7.152	-7.240	-0.088	38.60
MgH2PO4+	9.706e-09	7.930e-09	-8.013	-8.101	-0.088	(0)
CaH2PO4+	8.632e-09	7.052e-09	-8.064	-8.152	-0.088	(0)
FeH2PO4+	2.450e-09	2.002e-09	-8.611	-8.699	-0.088	(0)
PO4-3	1.966e-09	2.726e-10	-8.706	-9.564	-0.858	-21.24
H3PO4	7.384e-13	7.490e-13	-12.132	-12.126	0.006	47.24
FeHPO4+	9.373e-22	7.622e-22	-21.028	-21.118	-0.090	(0)
FeH2PO4+2	2.457e-22	1.095e-22	-21.610	-21.961	-0.351	(0)
Pb	5.331e-07					
Pb(CO3)2-2	2.864e-07	1.230e-07	-6.543	-6.910	-0.367	(0)
PbCO3	2.437e-07	2.472e-07	-6.613	-6.607	0.006	(0)
PbHCO3+	2.518e-09	2.038e-09	-8.599	-8.691	-0.092	(0)
PbOH+	2.174e-10	1.760e-10	-9.663	-9.754	-0.092	(0)
Pb+2	1.674e-10	7.185e-11	-9.776	-10.144	-0.367	-14.95
PbCl+	3.402e-11	2.754e-11	-10.468	-10.560	-0.092	7.96
Pb(OH)2	8.480e-12	8.603e-12	-11.072	-11.065	0.006	(0)
PbNO3+	1.192e-12	9.646e-13	-11.924	-12.016	-0.092	(0)
PbCl2	4.726e-13	4.794e-13	-12.325	-12.319	0.006	34.72
PbF+	3.880e-14	3.141e-14	-13.411	-13.503	-0.092	(0)
Pb(OH)3-	1.533e-14	1.241e-14	-13.814	-13.906	-0.092	(0)
PbCl3-	4.793e-15	3.880e-15	-14.319	-14.411	-0.092	65.77
PbCl4-2	4.386e-17	1.883e-17	-16.358	-16.725	-0.367	101.65
PbF2	1.554e-17	1.576e-17	-16.809	-16.802	0.006	(0)
Pb(OH)4-2	8.320e-18	3.571e-18	-17.080	-17.447	-0.367	(0)
Pb2OH+3	1.898e-18	2.831e-19	-17.722	-18.548	-0.826	(0)
PbF3-	3.468e-21	2.807e-21	-20.460	-20.552	-0.092	(0)
Pb3(OH)4+2	1.801e-22	7.731e-23	-21.744	-22.112	-0.367	(0)
PbF4-2	7.695e-26	3.303e-26	-25.114	-25.481	-0.367	(0)
Si	5.013e-04					
H4SiO4	4.910e-04	4.981e-04	-3.309	-3.303	0.006	52.34
H3SiO4-	1.035e-05	8.312e-06	-4.985	-5.080	-0.095	28.10
H2SiO4-2	1.309e-10	5.835e-11	-9.883	-10.234	-0.351	(0)
SiF6-2	2.018e-33	8.827e-34	-32.695	-33.054	-0.359	43.18
Sr	3.140e-06					
Sr+2	2.373e-06	1.069e-06	-5.625	-5.971	-0.346	-17.19
SrHCO3+	6.450e-07	5.269e-07	-6.190	-6.278	-0.088	(0)
SrCO3	1.219e-07	1.237e-07	-6.914	-6.908	0.006	-14.14
SrOH+	8.469e-12	6.887e-12	-11.072	-11.162	-0.090	(0)
Zn	2.765e-07					
Zn(CO3)2-2	2.466e-07	1.059e-07	-6.608	-6.975	-0.367	(0)
ZnCO3	2.465e-08	2.501e-08	-7.608	-7.602	0.006	(0)
ZnHCO3+	3.516e-09	2.846e-09	-8.454	-8.546	-0.092	(0)
Zn+2	1.448e-09	6.330e-10	-8.839	-9.199	-0.359	-24.61
Zn(OH)2	1.240e-10	1.258e-10	-9.907	-9.900	0.006	(0)
ZnOH+	8.560e-11	6.929e-11	-10.068	-10.159	-0.092	(0)
ZnOHC1	2.695e-11	2.733e-11	-10.570	-10.563	0.006	(0)
ZnCl+	1.927e-11	1.547e-11	-10.715	-10.810	-0.095	-17.04
ZnF+	2.614e-13	2.116e-13	-12.583	-12.674	-0.092	(0)
ZnCl2	1.638e-13	1.661e-13	-12.786	-12.780	0.006	108.14
Zn(OH)3-	6.174e-14	4.997e-14	-13.209	-13.301	-0.092	(0)
ZnCl3-	2.366e-15	1.900e-15	-14.626	-14.721	-0.095	16.40
ZnCl4-2	2.207e-17	9.649e-18	-16.656	-17.016	-0.359	145.73
Zn(OH)4-2	2.318e-18	9.950e-19	-17.635	-18.002	-0.367	(0)

ANEXO 1 – PERFIL CONSTRUTIVO DO POÇO DE MONITORAMENTO PM29, INSTALADO DENTRO DO MACIÇO DE RESÍDUOS DO LIXÃO SANTA MADALENA

ANEXO 2 – LINHAS DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO E MAPAS DE RESISTIVIDADE NA ÁREA DO LIXÃO SANTA MADALENA – SÃO CARLOS/SP

Figura 6.4.4 – Mapa de Contorno da Resistividade (Superficial)

Figura 6.4.5 – Mapa de Contorno da Resistividade (Profundidade 7 m)

Figura 6.4.6 – Mapa de Contorno da Resistividade (Profundidade 15 m)

Figura 6.4.7 – Mapa de Contorno da Resistividade (Profundidade 25 m)

Figura 6.4.8 – Mapa de Contorno da Resistividade (Profundidade 38 m)

Figura 6.4.9 – Mapa de Contorno da Resistividade (Profundidade 55 m)

Figura 6.4.10 – Mapa de Contorno da Resistividade (Profundidade 75 m)

ANEXO 3 – MAPA POTENCIOMÉTRICO DO LIXÃO SANTA MADALENA – SÃO CARLOS/SP DE JULHO E DE DEZEMBRO DE 2010, RESPECTIVAMENTE