

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

CAROLINE CORRÊA MANASTELLA
KEVIN YUKIHIRO GOIA

**PANORAMA DAS INVESTIGAÇÕES AMBIENTAIS E DO GERENCIAMENTO DE
ÁREAS CONTAMINADAS NO ANTIGO LIXÃO SANTA MADALENA - SÃO
CARLOS - SP**

São Carlos
2022

CAROLINE CORRÊA MANASTELLA
KEVIN YUKIHIRO GOIA

PANORAMA DAS INVESTIGAÇÕES AMBIENTAIS E DO GERENCIAMENTO DE
ÁREAS CONTAMINADAS NO ANTIGO LIXÃO SANTA MADALENA – SÃO CARLOS
- SP

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação de Engenharia Ambiental, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Dra. Alice Kimie Martins Morita

São Carlos

2022

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.

M267p

Manastella, Caroline Corrêa

Panorama das investigações ambientais e do gerenciamento de áreas contaminadas no antigo lixão Santa Madalena / Caroline Corrêa Manastella, Kevin Yukihiro Goia; orientador Alice Kimie Martins Morita -- São Carlos, 2022.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Decisão de Diretoria 038/2017/C. 3. Investigação detalhada. 4. Análise de risco. I. Manastella, Caroline Corrêa. II. Goia, Kevin Yukihiro. III. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Caroline Corrêa Manastella e Kevin Yukihiro Goia**

Data da Defesa: 11/07/2022

Comissão Julgadora:

Resultado:

Alice Kimie Martins Morita (Orientador(a))

Aprovados

Valdir Schalch

Aprovados

Valeria Guimarães Silvestre Rodrigues

Aprovados



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Agradecimentos

Agradecemos aos nossos pais por nunca terem medido esforços para nos proporcionar estudo de qualidade durante toda a nossa trajetória, e por todo suporte e incentivo ao longo da graduação e realização deste trabalho de conclusão do curso.

Aos nossos familiares, que sempre estiveram ao nosso lado, demonstrando apoio ao longo da realização do curso.

Aos nossos amigos, pela amizade, cumplicidade e companheirismo durante todos os momentos de alegria e de dificuldades pelos quais passamos juntos.

A todos os alunos das nossas turmas pela convivência, descobertas e aprendizados ao longo dos últimos anos.

A todos os nossos colegas de curso, com quem convivemos intensamente durante a graduação, pela oportunidade de conhecê-los e trocarmos experiências que nos permitiram crescer, não só pessoalmente, mas profissionalmente.

A todos os professores, que sempre demonstraram disposição para ensinar e compartilhar conhecimentos, por todos os ensinamentos e orientações que colaboraram para o nosso crescimento profissional.

À nossa orientadora, Dra. Alice Kimie Martins Morita, por todo o suporte proporcionado para o desenvolvimento deste trabalho de graduação, quem nos conduziu com paciência e dedicação, compartilhando seus conhecimentos.

À Universidade de São Paulo e, especialmente, à Escola de Engenharia de São Carlos, que foram essenciais no nosso processo de formação profissional, pela oportunidade e por tudo o que aprendemos ao longo do curso.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a nossa formação, participando direta ou indiretamente do nosso processo de aprendizagem e de crescimento.

Resumo

MANASTELLA, C. C.; GOIA, K. Y. **Panorama das investigações ambientais e do Gerenciamento de Áreas Contaminadas no antigo lixão Santa Madalena – São Carlos - SP.** 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A investigação ambiental de uma área contaminada, tais como os lixões e aterros controlados, visa o detalhamento do meio físico e da contaminação para a proposição de um plano de intervenção, sendo necessário seguir as diretrizes do processo do Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), as quais, no estado de São Paulo, são fornecidas por meio da Decisão de Diretoria 038/2017/C. No caso do antigo e desativado lixão Santa Madalena, localizado em São Carlos – SP, foram realizadas não apenas investigações técnicas no âmbito do GAC, mas também abundantes pesquisas científicas, que podem contribuir para o cumprimento das diretrizes mencionadas. Neste sentido, este trabalho realizou a análise das informações existentes relativas a este depósito de resíduos, por meio dos estudos acadêmicos e técnicos que foram desenvolvidos na área em questão. A partir de uma abordagem voltada ao GAC e em conformidade com as exigências e diretrizes legais vigentes atualmente, foram identificadas diversas lacunas de informações consideradas necessárias ao gerenciamento da área em estudo. A Investigação Detalhada (ID) e a Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH), conduzidas em 2010 no antigo lixão, revelaram inconsistências e dados insuficientes para subsidiar as etapas posteriores previstas no GAC. Tal constatação pode ser exemplificada pela generalização das características e propriedades do meio físico, tais como a condutividade hidráulica e a porosidade, pela falta de caracterização e delimitação da contaminação e pela ausência da determinação dos caminhos de exposição dos contaminantes, desde a fonte até os efetivos ou potenciais receptores. Os estudos acadêmicos, por sua vez, apesar de não utilizarem os critérios técnicos necessários à investigação de áreas contaminadas, apresentaram resultados que podem nortear os futuros estudos na área em questão. Tais resultados podem ser exemplificados pela verificação de camadas silto-argilosas, que apontam para a heterogeneidade do meio físico, pela determinação do fluxo das águas subsuperficiais direcionado para noroeste, pela verificação da contaminação das águas superficiais adjacentes ao antigo lixão, pela delimitação aproximada da antiga voçoroca onde foram depositados os resíduos e pela verificação recente do caráter não inerte desses materiais, entre outros. Complementarmente, os estudos acadêmicos proporcionaram dados recentes que apontam para a necessidade da continuidade dos estudos na área, uma vez que constataram a contaminação do meio, mesmo após 25 anos do encerramento do antigo lixão. A partir da análise dos referidos estudos e das diretrizes legais vigentes, recomenda-se, a curto prazo, a realização de uma nova Investigação Detalhada e uma nova Avaliação de Risco à Saúde Humana, as quais devem considerar as sugestões que foram fornecidas no presente trabalho de graduação, especificadas para cada uma das referidas etapas. Ademais, recomenda-se a realização de investigações aprofundadas e detalhadas na área objeto de estudo que integrem os aspectos de interesse ambiental, social, técnico, econômico e de saúde pública. Para tal, é recomendado o estabelecimento de parcerias entre os responsáveis legais da área contaminada, órgãos ambientais e universidades, visando o monitoramento contínuo da qualidade dos recursos ambientais afetados.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Decisão de Diretoria 038/2017/C; Investigação Detalhada; Análise de Risco.

Abstract

MANASTELLA, C. C.; GOIA, K. Y. **Overview of environmental investigations and management of contaminated sites on former dump site Santa Madalena – São Carlos – SP**, 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

The environmental assessment of a contaminated area, such as dump sites and non-sanitary landfills, aims the local and contamination characterization for the proposition of an intervention plan, following the guidelines proposed by the management of contaminated sites (GAC), which in the state of São Paulo are provided by the Board Decision 038/2017/C. In the case of former and disabled dump site Santa Madalena, located in São Carlos – SP, not only technical investigations were made, but also abundant scientific surveys, which can help fulfilling the mentioned guidelines. In this sense, this work analyzed the existing information related to this waste deposit through academic and technical studies that were developed in the area. Based on an approach focused on the GAC and in compliance with the legal requirements and guidelines currently in force, several information gaps considered necessary for the management of the area were identified. The Detailed Investigation (ID) and the Human Health Risk Assessment (ARSH), conducted in 2010 at the former dump, revealed inconsistencies and insufficient data to support the subsequent steps foreseen in the GAC. This finding can be exemplified by the generalization of the characteristics and properties of the physical environment, such as hydraulic conductivity and porosity, by the lack of characterization of the contamination and by the absence of determination of exposure paths of the contaminants from the source to the effective ones or potential receptors. The academic studies, on the other hand, despite not using the technical criteria necessary for the investigation of contaminated areas, presented results that could guide future studies in the area. Such results can be exemplified by: the verification of silty-clay layers that point to the heterogeneity of the physical environment; determination of the flow of subsurface waters directed to the northwest; verification of the contamination of surface waters adjacent to the old dump and the approximate delimitation of the old gully, where the waste was deposited and the recent verification of the non-inert character of these materials, among others. In addition, academic studies have provided recent data that point to the need to continue the studies in the area, since they found the contaminations of the environment even 25 years after the closure of the old dump. Based on the analysis of the referred studies and the current legal guidelines, it is recommended in the short term, to carry out a new ID and a new ARSH, which should consider the suggestions that were provided in this work. Furthermore, it is recommended to carry out in depth and detailed investigations in the area that integrate aspects of environmental, social, technical, economic, and public health interests. To this end, it is recommended the establishment of partnership between those responsible for the area, environmental agencies, and universities, aiming at the continuous monitoring of the quality of the affected environmental resources.

Key Words: Urban Solid Waste, Board Decision 038/2017/C; Detailed Investigations; Risk Assessment

Lista de Siglas

ABETRE - Associação Brasileira de Empresas Tratamento de Resíduos e Efluentes

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC - Área Contaminada

ACI - Área Contaminada sob Investigação

ACRe - Área Contaminada em Processo de Remediação

ACRi - Área Contaminada com Risco Confirmado

Al - Alumínio

AME - Área em Processo de Monitoramento para Encerramento

ARSH - Avaliação de Risco à Saúde Humana

APA - Área de Proteção Ambiental

AP - Área Potencialmente Contaminada

AR - Área Reabilitada para Uso Declarado

AS - Área Suspeita de Contaminação

As - Arsênio

Ca - Cálcio

Cd - Cádmi

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Co - Cobalto

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cr - Cromo

CQI - Composto Químico de Interesse

CTC - Capacidade de Troca Catiônica

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DD - Decisão de Diretoria

DQO - Demanda Química de Oxigênio

Fe - Ferro

GAC - Gerenciamento de Áreas Contaminadas

Hg- Mercúrio

HPT - *Hydraulic Profiling Tool*

HRSC - *High Resolution Site Characterization*

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ID - Investigação Detalhada

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISWA - *International Solid Waste Association*

K - Condutividade Hidráulica

K - Potássio

MCA - Modelo Conceitual da Área

Mn - Manganês

Mg - Magnésio

Na - Sódio

NBR - Norma Brasileira Registrada

Ni - Níquel

NO₃⁻ - Nitrato

OD - Oxigênio Dissolvido

P - Fósforo

Pb - Chumbo

pH - Potencial Hidrogeniônico

PM - Poço de monitoramento

PNMA - Política Nacional do Meio Ambiente

PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos

UC - Unidade de Conservação

SAG – Sistema Aquífero Guarani

Se – Selênio

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

Sb - Antimônio

SEV - Sondagem Elétrica Vertical

SQI - Substância Química de Interesse

SVOC - Compostos Orgânicos Semivoláteis

VO - Valores Orientadores

VOC - Compostos Orgânicos Voláteis

Zn – Zinco

Lista de Figuras

Figura 1- Fluxograma do Gerenciamento de Áreas Contaminadas.....	36
Figura 2 - Localização do Lixão Santa Madalena	37
Figura 3- Localização dos poços de monitoramento existentes e instalados em julho de 2010	40
Figura 4- Localização dos poços de monitoramento e pontos de sondagem.....	41
Figura 5- Localização dos poços de monitoramento, poços multiníveis e coleta de água superficial	43
Figura 6 - Mapa Potenciométrico (julho de 2010)	44
Figura 7- Mapa Potenciométrico (dezembro de 2010).....	44
Figura 8 - Pluma de contaminação por chumbo	45
Figura 9 - Pluma de contaminação por cobalto	46
Figura 10 - Resultados analíticos de metais na água subterrânea (mg/L)	46
Figura 11 - Perfil pedológico e construtivo de alguns poços de monitoramento instalados no âmbito da ID	47
Figura 12 - Tabela resumo das vias de exposição determinadas na ARSH	49
Figura 13 - Mapa de medidas de intervenção para a área	50
Figura 14 - Gráficos 2d e 3d da condutividade aparente com o aparelho EM31	53
Figura 15 - Localização dos poços avaliados	55
Figura 16 - Localização dos pontos de amostragem avaliados e representação gráfica das curvas de isovalores	57
Figura 17 - Coordenadas UTM e cotas dos poços de monitoramento avaliados	58
Figura 18 - Localização dos pontos de amostragem.....	60
Figura 19 - Granulometria dos pontos obtida.....	60
Figura 20 - Capacidade de troca catiônica dos ponto	61
Figura 21 - Condutividade hidráulica para cada ponto.....	61
Figura 22 - Perfil geofísico que corta o corpo do lixo	62
Figura 23 - Pontos de coleta de água superficial	65
Figura 24 - Comparação da qualidade do lixiviado obtida por diferentes estudos	67
Figura 25 - Localização dos poços de monitoramento e pontos de amostragem	68
Figura 26 - Parâmetros físico-químicos da água subterrânea.....	69
Figura 27 - Pontos de coleta e cortes utilizados para o modelo conceitual	71
Figura 28 - Coordenadas e características dos poços amostrados por Morita (2020).....	72

Figura 29 - Modelo conceitual da área de estudo.....	73
Figura 30 - Perfil de resistividade indicando possível contaminação	73
Figura 31 - Resultados obtidos nos ensaios geofísicos da ID.....	83
Figura 32 - Mapa de risco.....	85
Figura 33 - Contaminação por Fe em 2019	95
Figura 34 - Contaminação por Fe em 2010	95

Lista de Tabelas

Tabela 1: Resumo das exigências da DD 038 e sugestões para a Investigação Detalhada	112
Tabela 2: Resumo das exigências da DD 038 e sugestões para a Avaliação de Risco à Saúde Humana	114

Sumário

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE SIGLAS.....	8
LISTA DE TABELAS	13
1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo geral.....	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	23
3.1 Gerenciamento de Áreas Contaminadas	23
3.1.1. Histórico e panorama atual	23
3.1.2. O GAC no estado de São Paulo.....	25
3.1.3. Principais Conceitos	27
3.1.4. Etapas do GAC	29
3.2. O Lixão Santa Madalena e o GAC.....	36
3.2.1. Etapas Anteriores.....	39
3.2.2. Investigação Detalhada.....	41
3.2.3. Avaliação de Risco à Saúde Humana	47
3.2.4. Medidas de Intervenção.....	50
3.2.5. Recomendações	51
3.3. Estudos acadêmicos no Lixão Santa Madalena	51
4. MATERIAL E MÉTODOS	75
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1. Análise da Investigação Ambiental Detalhada	76
5.2. Análise de estudos acadêmicos na área de estudo	89
5.3. Consolidação das informações existentes no âmbito do GAC.....	101
6. SUGESTÕES	108

7. CONCLUSÕES.....	116
REFERÊNCIAS	118
ANEXOS	125

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico, o crescimento populacional, a urbanização e as revoluções tecnológicas vêm sendo acompanhados por alterações no estilo de vida, nos modelos de produção e nos padrões de consumo da população (GOUVEIA, 2012). Atualmente, tais fatores, em conjunto com a falta de conscientização ambiental, acarretam o aumento expressivo da geração de resíduos e a conseqüente necessidade da disposição ambientalmente segura desses materiais, o que torna o seu gerenciamento um desafio maior e mais complexo a cada dia (KAZA et al., 2018).

Considerando o cenário brasileiro, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontou um aumento de 10% da população entre 2010 e 2019, isto é, em cerca de uma década, houve o aumento populacional de, aproximadamente, 19,5 milhões de habitantes no país, totalizando 210 milhões de indivíduos (IBGE, 2020). No mesmo período e, em conformidade com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2020, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), “a geração de resíduos sólidos urbanos no país registrou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano” (ABRELPE, 2020).

Além disso, o supracitado estudo revela que a geração *per capita* de resíduos no período considerado aumentou de 348 kg/ano para 379 kg/ano, sendo que, em 2019, cada indivíduo da população brasileira produziu cerca de 1 kg de resíduos por dia. Complementarmente, estudos mais recentes demonstraram que, em 2020, cada brasileiro gerou, em média, 1,07 kg de resíduos diariamente e que tal aumento expressivo é decorrente das novas dinâmicas sociais adotadas devido à pandemia de COVID-19 (ABRELPE, 2021), as quais tendem, em partes, a permanecer como estilo de vida da população, acarretando uma maior geração de resíduos.

De acordo com Ferreira e Anjos (2001), “além do acréscimo na quantidade, os resíduos produzidos atualmente passaram a abrigar em sua composição elementos sintéticos e perigosos aos ecossistemas e à saúde humana, em virtude das novas tecnologias incorporadas ao cotidiano”. Além de sua composição variada e, frequentemente, desconhecida, os resíduos sólidos se caracterizam por configurarem um dos maiores desafios da sociedade moderna, que consiste na gestão desses materiais e na disposição ambientalmente adequada e segura à saúde da população e dos ecossistemas.

Neste sentido, a temática “resíduos” começou a ganhar importância, principalmente no que tange à saúde pública, após a Revolução Industrial, sendo que, a partir da década de 70, passou a ter maior peso ambiental, tanto em âmbito nacional, quanto internacional, quando foi incorporada às agendas de grandes encontros internacionais, tais como a Conferência de Estocolmo (1972) ocorrida na Suécia, a ECO-92 (1992) realizada no Rio de Janeiro – Brasil, entre outros encontros que abordaram questões relevantes para o meio ambiente (VELLOSO, 2008; WILSON, 2007).

A preocupação mundial relativa aos resíduos sólidos, especialmente os domiciliares, tem aumentado diante do crescimento da população e do gerenciamento inadequado, incluindo a destinação final desses materiais. Jacobi e Besen (2011) afirmam que a gestão e a disposição inadequada dos resíduos sólidos causam impactos socioambientais, tais como a degradação do solo, o comprometimento dos corpos d’água e mananciais, a intensificação das enchentes, a contribuição para a poluição do ar e a proliferação de vetores de importância sanitária.

Diante do cenário preocupante e desafiador do gerenciamento de resíduos, o Brasil, que ainda utiliza consideravelmente os lixões e aterros controlados como dispositivos para a destinação final de resíduos de diversas origens, passou a ter um posicionamento em relação à existência dos lixões com a criação da Lei nº6.938, de 31 de agosto de 1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), a qual reconheceu e declarou que os lixões são fontes de poluição (BRASIL, 1981).

Mais tarde, em 1998, a existência dos lixões passou a ser considerada crime ambiental, de acordo com a Lei nº9.605, de 12 de fevereiro de 1998. A referida lei declara como crime ambiental “causar poluição de qualquer natureza em níveis que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora” (BRASIL, 1998), que ocorram por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, sendo o autor do crime submetido a uma pena de reclusão durante um período de 1 a 5 anos.

Mais de uma década depois, em 2010, foi elaborada a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº12.305, de 02 de agosto de 2010, a qual regulamentou a destinação dos resíduos sólidos no país e concedeu um prazo para a extinção dos lixões até o ano 2014 (BRASIL, 2010). Contudo, tal prazo deixou de ser respeitado, sendo necessária a determinação de novas metas, tais como as estabelecidas pelo Novo Marco Legal do

Saneamento, que, em 2020, foi instaurado por meio da Lei nº14.026, de 15 de julho de 2020, abrindo novos caminhos para que o Brasil pudesse extinguir os lixões. Tal marco regulatório definiu novas regras para a universalização dos serviços de água, de esgoto e para a erradicação dos lixões, determinando novos prazos para que as prefeituras promovessem a destinação inteligente dos resíduos gerados em seus territórios.

De acordo com os incisos I a IV do artigo 54 da lei que atualizou o marco do saneamento, todos os municípios deveriam apresentar um plano para acabar de vez com os lixões até o último dia de 2020. Para as capitais e municípios das regiões metropolitanas, o prazo para resolver esse problema foi agosto de 2021; já para os municípios com mais de 100 mil habitantes, o prazo se estende até agosto de 2022; e para os municípios com população entre 50 e 100 mil habitantes, o prazo é o ano 2023. Por fim, 2024 é o prazo final de adequação para os municípios com menos de 50 mil habitantes (BRASIL, 2020).

Conforme exposto, a legislação brasileira fornece objetivos e diretrizes, além de instrumentos para a correta destinação dos resíduos no país. Contudo, o cenário brasileiro, no que tange à temática e ao meio ambiente, ainda é preocupante, uma vez que, em conformidade com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2021), áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda estão em operação e receberam quase 40% do total de resíduos coletados. Ademais, a ABRELPE (2021) informa que, dos 5.570 municípios brasileiros, 2.868 municípios, isto é, 51,5% realizam a disposição inadequada dos resíduos gerados em seus territórios, sendo utilizados dispositivos tais como os aterros controlados e os lixões.

Devido à sua importância e às consequências ambientais que causam, os lixões são definidos como dispositivos de “disposição final dos resíduos sólidos urbanos, no qual esses são lançados sobre o solo, sem qualquer medida de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública” (NASCIMENTO, 2007). O autor complementa que nos lixões não existe controle sobre o tipo, o volume ou o grau de periculosidade dos resíduos que são depositados, uma vez que esses são lançados sobre o solo natural, sem receber qualquer tipo de tratamento prévio para a redução de seus volumes ou de sua periculosidade (NASCIMENTO, 2007).

Segundo a ABRELPE e ISWA - *International Solid Waste Association* - (2015), os principais impactos causados pelos lixões para a saúde pública e o meio ambiente são ocasionados pelas emissões geradas pela decomposição dos resíduos, especialmente pelo

chorume, líquido cujas principais características são o seu cheiro, a coloração escura e a elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), além do enorme potencial poluente. Ademais, à medida que as águas pluviais infiltram no solo, os constituintes químicos e biológicos dos resíduos lixiviam e, se não controlados adequadamente, percorrem o solo, causando sua contaminação e a contaminação de mananciais de água subterrânea e de águas superficiais (ABRELPE & ISWA, 2015).

Além da contaminação dos solos e das águas, pode-se estabelecer uma relação entre a existência de lixões e a proliferação de vetores de doenças, tais como moscas, ratos e mosquitos e a geração de maus odores, caracterizando os lixões como ameaças significativas à saúde da população. Estudos realizados por Gouveia (2012) revelaram que as áreas próximas aos lixões apresentam níveis elevados de compostos orgânicos e metais potencialmente tóxicos. Sendo assim, as populações residentes nas proximidades desses locais apresentam níveis elevados desses compostos no sangue, tendo sido relatados riscos aumentados para diversos tipos de câncer, anomalias congênitas, baixo peso em recém-nascidos, abortos e mortes neonatais em populações vizinhas aos dispositivos inadequados de resíduos.

Em suma, os dispositivos inapropriados de disposição de resíduos podem comprometer a qualidade ambiental dos solos, das águas superficiais e subterrâneas e do ar, por serem fontes de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis (VOC e SVOC), pesticidas, solventes, metais potencialmente tóxicos, entre outros (GOUVEIA, 2012), a depender da origem e composição dos resíduos depositados. É importante destacar que a destinação incorreta dos resíduos sólidos gera prejuízos não só ambientais, mas sociais, jurídicos, territoriais, econômicos, sanitários e, principalmente, de saúde pública.

Ademais, os processos que levam à contaminação do meio ocorrem não somente enquanto o lixão está em funcionamento, mas também após a sua desativação, uma vez que os compostos contaminantes continuam a ser degradados e lixiviados ao longo do tempo. O fechamento ou adequação dos lixões são essenciais para o controle de impactos atuais e futuros (ISWA & ABRELPE, 2016), contudo, ainda que seu fechamento contribua para a redução dos impactos no meio ambiente, o final da operação de um lixão não cessa o conjunto de problemas que ele causa, sendo necessária a adoção de medidas posteriores ao fechamento dos lixões, que visem a reabilitação da área por meio da mitigação e/ou controle dos impactos causados (MUKHERJEE, 2014).

Nesse contexto, enquadra-se o Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), processo definido, em âmbito federal, pelo Decreto nº59.263, de 5 de junho de 2013, o qual regulamentou a Lei nº13.577, de 08 de julho de 2009, e dispõe sobre as “diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas”. O referido decreto entende o Gerenciamento de Áreas Contaminadas como o “conjunto de medidas que asseguram o conhecimento das características da área contaminada e a definição de medidas de intervenção mais adequadas a serem exigidas, visando eliminar ou minimizar os danos e/ou riscos aos bens a proteger, gerados pelos contaminantes nela contidas” (SÃO PAULO, 2013).

Em geral, o GAC visa a recuperação de áreas contaminadas, isto é, qualquer local e região que contenha concentrações de substâncias químicas ou resíduos que foram introduzidos pelo homem, acidental ou propositadamente, ou até mesmo que ocorram naturalmente no meio e que causem ou tenham potencial de causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outros bens a proteger (BRASIL, 2020)

Apesar da existência de normas e de leis relativas ao GAC, ainda há poucos dados e informações consolidados sobre as questões-chave para o gerenciamento de áreas contaminadas por dispositivos inapropriados de disposição de resíduos no país. Além disso, a falta de um levantamento consistente das áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas limita a atuação dos órgãos competentes, promovendo a continuidade dos impactos ambientais, econômicos e de saúde pública (BRASIL, 2020)

No Brasil, de acordo com estimativa feita pelo Programa Nacional de Recuperação de Áreas Contaminadas, os lixões representam 3% das áreas contaminadas existentes no país, sendo precedidos no *ranking* por postos de combustíveis (71,1%) e atividades industriais (19,5%) e comerciais (4,4%) (BRASIL, 2020). Essa baixa porcentagem não representa a situação atual, uma vez que são contabilizados apenas os lixões que passaram pelo processo do GAC, que em números representa 193 áreas dentre os 3.257 lixões existentes em 2020, segundo o presidente da ABETRE¹. Portanto, os lixões e depósitos inadequados de disposição de resíduos não devem ser negligenciados. Conforme revelado por Morita et al. (2021), por meio do levantamento de estudos relativos a esses dispositivos, somente 4% dos lixões e aterros

¹ Entrevista realizada pela Agência Brasil, publicada no dia 06/09/2021, disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-09/vinte-lixoes-foram-desativados-entre-marco-e-junho-no-brasil#:~:text=%22Quando%20fizemos%20os%20primeiros%20estudos,existiam%203.257%20lix%C3%B5es%20no%20Brasil.>

controlados existentes no Brasil foram alvos de estudos ambientais, o que demonstra que essas áreas não são prioridade no que tange a recuperação/gerenciamento de áreas contaminadas.

Dado o contexto no qual os lixões estão inseridos, no que tange ao gerenciamento de áreas contaminadas, e a falta de estudos que promovam avanço nos processos de gestão e recuperação dessas áreas, o presente trabalho visa contribuir com o progresso dos estudos ambientais relativos ao antigo e desativado Lixão Santa Madalena, situado na zona rural do município de São Carlos – SP, em região de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Apesar de representar o lixão brasileiro com maior número de estudos, totalizando 14 até o ano de 2020 (MORITA et al., 2021), o referido lixão tem seu processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas estagnado desde 2011, estando na Lista de áreas contaminadas com risco confirmado da CETESB (CETESB, 2020).

Tendo o referido lixão como objeto de estudo, buscou-se realizar o levantamento de informações ambientais existentes relativas ao maciço de resíduos que, durante décadas, recebeu enormes quantidades de materiais de origem domiciliar, industrial, entre outras. Portanto, o presente trabalho de graduação busca contribuir com o avanço do GAC nessa área, por meio de uma análise crítica dos estudos anteriormente desenvolvidos no antigo lixão, os quais podem auxiliar na escolha de abordagens e métodos a serem futuramente utilizados na continuidade do gerenciamento dessa área contaminada.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho foi obter um panorama das investigações e estudos realizados no antigo lixão Santa Madalena, identificando os principais resultados obtidos e a existência de possíveis lacunas de informações que são necessárias ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas, de forma a contribuir com a continuidade das investigações ambientais no local.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Realizar o levantamento dos estudos desenvolvidos na área em avaliação, nos âmbitos acadêmico e técnico, a fim de determinar a relevância desses para a continuidade dos processos de Gerenciamento de Áreas Contaminadas;
- Confrontar as atividades realizadas na Investigação Detalhada com a Decisão de Diretoria vigente atualmente;
- Consolidar as informações existentes, resultantes das investigações técnicas e acadêmicas anteriores, e estabelecer sugestões para a continuidade dos estudos ambientais na área em estudo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Gerenciamento de Áreas Contaminadas

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2021), uma área contaminada (AC) pode ser definida como:

Uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural.

A CETESB (2021) também define que, nas áreas denominadas “áreas contaminadas”, os poluentes ou contaminantes podem estar concentrados em diferentes compartimentos do ambiente, tais como solos, sedimentos, rochas, materiais utilizados para aterramento, águas subterrâneas ou, de maneira geral, nas zonas não saturadas ou saturadas do meio, podendo também estar presentes nas paredes, pisos e nas estruturas de construção.

Outra definição que pode ser encontrada no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2021) consiste na simples e condensada afirmação:

Uma Área Contaminada é definida como uma área onde existe ou existiu fonte de contaminação primária e, como resultado, contém quantidades de matéria ou concentrações de substâncias em, ao menos, um dos compartimentos ambientais capazes de causar danos aos bens a proteger (CETESB, 2021).

Tal definição de AC contém conceitos fundamentais para o entendimento dos processos e etapas envolvidos no Gerenciamento das Áreas Contaminadas (GAC), o qual é abordado no subitem 3.1.2 e tem seus principais conceitos e etapas apresentados nos subitens 3.1.3 e 3.1.4, respectivamente, a fim de proporcionar um conhecimento suficiente do GAC para que seja possível o entendimento do atual cenário no qual se insere o antigo Lixão Santa Madalena.

3.1.1. Histórico e panorama atual

Desde que o homem iniciou suas atividades produtivas de forma organizada, o meio ambiente sofre com as consequências, tais como impactos negativos e poluição. O papel da revolução industrial, a qual ocorreu no século XVIII, teve sua contribuição no aumento expressivo do consumo de recursos naturais e na fabricação de novos produtos químicos.

Yoshikawa e Fretas. (2014) afirmam que, desde então, o meio passou a ser o receptáculo de todos os resíduos e substâncias provenientes do processo de industrialização, gerando diversas áreas contaminadas e incontáveis impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente (YOSHIKAWA; FREITAS, 2014).

De acordo com Cortês et al. (2011), a temática “Áreas Contaminadas” começou a ser discutida no final da década de 70, devido à repercussão do caso *Love Canal* que ocorreu em Nova Iorque, nos Estados Unidos, no qual foi verificado o borbulhamento de toneladas de resíduos industriais nos quintais, porões e encanamentos residenciais. Entretanto, anos antes, em 1956, foi verificado um desastre, também relacionado à contaminação do meio ambiente, que ficou conhecido como Desastre de Minamata, ocorrido na cidade de mesmo nome, no Japão, que contaminou centenas de pessoas por mercúrio em consequência do lançamento de rejeitos realizado por uma indústria desde 1930 (YOSHIKAWA; FREITAS, 2014).

A partir dos exemplos brevemente apresentados, pode-se observar que as questões ambientais e de saúde pública relacionadas à contaminação do meio ambiente não são recentes e que, desde o século passado, a preocupação com a temática passou a fazer parte do cotidiano dos envolvidos e dos demais interessados. Dessa forma, as questões ambientais globais vêm sendo discutidas por meio de iniciativas governamentais, dentre as quais se destacam as Conferências sobre o Meio Ambiente das Nações Unidas, realizadas em Estocolmo, em 1972, e no Rio de Janeiro, em 1992. Assim, o GAC se insere na agenda mundial ambiental como parte de seus princípios, em especial o Princípio da Obrigatoriedade da Intervenção Estatal (SCHEFFER, 2017).

De acordo com o Guia de Plano de Intervenção, elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, o cenário desejado para o gerenciamento de áreas contaminadas ainda não foi implementado no país, sendo que “há pouco para ser comemorado” (IPT, 2014). O posicionamento do Instituto é justificado pela ausência de políticas bem estabelecidas, principalmente de políticas estaduais, relativas à gestão de áreas contaminadas, que abordem o tema como uma prioridade ou que o estructure minimamente para que possam ser cumpridas as obrigações, em nível federal, determinadas pela Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009.

Conforme mencionado anteriormente, a Lei Federal nº 6.938, de 1981, estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente, a qual determina as regras legais para a temática ambiental no país de maneira ampla. No que se refere especificamente ao gerenciamento de

áreas contaminadas, Yoshikawa e Freitas (2014) afirmam que, apesar de a legislação brasileira ser recente, ela é sofisticada. Como exemplo disso, pode-se mencionar, em nível federal, a Resolução CONAMA 420, de 2009, a qual dispõe sobre os critérios e valores orientadores quanto à presença de substâncias químicas no solo e água subterrânea e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por tais substâncias em decorrência de atividade antrópicas. Além disso, a nível estadual, pode-se mencionar a Decisão de Diretoria nº038/2017/C da CETESB, a qual dispõe sobre os procedimentos para o GAC no estado de São Paulo.

Além da CETESB, merecem destaque, no que tange ao gerenciamento de áreas contaminadas, os órgãos ambientais de Minas Gerais (FEAM), do Rio de Janeiro (INEA), do Paraná (IAP), de Santa Catarina (FATMA) e do Rio Grande do Sul (FEPAM), os quais têm trabalhado para que o GAC seja desenvolvido de maneira adequada e satisfatória em seus respectivos territórios.

Ademais, em âmbito nacional, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) já desenvolveu e vem desenvolvendo e aprimorando normas específicas nomeadas NBR (Norma Brasileira Registrada). No que tange ao GAC, pode-se citar as NBR nº15.515-1, nº15.515-2 e nº15.515-3, as quais especificam o detalhamento necessário em cada um dos seguintes estudos: Avaliação Preliminar, Investigação Confirmatória e Investigação Detalhada, respectivamente. Tais estudos se caracterizam como etapas do gerenciamento de áreas contaminadas, conforme será apresentado no subitem 3.1.4.

3.1.2. O GAC no estado de São Paulo

O gerenciamento de áreas contaminadas pode ser entendido como o conjunto de medidas que tem o objetivo de minimizar o risco, acarretado pela existência de áreas contaminadas, para a população humana, e de viabilizar o uso seguro dessas áreas (CETESB, 2021). Tais medidas auxiliam na tomada de decisão para o estabelecimento de formas de intervenção mais adequadas para cada cenário, considerando-se as peculiaridades observadas em cada área contaminada.

A CETESB ainda define o GAC como o conjunto de ações que envolve a identificação, a caracterização e a implementação de medidas de intervenção em áreas contaminadas que se situam em uma região de interesse. Para o referido órgão ambiental, o objetivo principal do

gerenciamento em questão é viabilizar o uso seguro dessas áreas, atribuindo a elas a última classificação determinada no processo de GAC: Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR). As classificações atribuídas às áreas em processo de gerenciamento estão apresentadas no subitem 3.1.4 – Etapas do GAC.

A metodologia empregada no gerenciamento de áreas contaminadas descreve detalhadamente os métodos que devem ser utilizados para a execução de cada uma das etapas propostas, otimizando todos os recursos envolvidos – técnicos e econômicos – por meio da realização de etapas e procedimentos sequenciais que fornecem informações essenciais para a realização da etapa posterior.

O GAC, no estado de São Paulo, divide-se em dois diferentes processos, isto é, existem dois conjuntos de ações para a implementação total do gerenciamento. O primeiro conjunto de ações abrange a identificação e a caracterização da área contaminada, sendo nomeado Processo de Identificação das Áreas Contaminadas. Já o segundo conjunto de ações diz respeito à implementação de medidas de intervenção na área de interesse, viabilizando, dessa forma, o desejado uso seguro da área. Tal conjunto de ações é conhecido como Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas. Ambos os conjuntos de ações possuem 5 etapas sequenciais que serão descritas posteriormente.

A CETESB, órgão ambiental do estado de São Paulo, pode ser considerada pioneira no que diz respeito às áreas contaminadas e tem colaborado sistematicamente na definição de procedimentos técnicos, diretrizes, normas e padrões utilizados no GAC (IPT, 2014). Alguns exemplos disso são suas iniciativas, tais como a elaboração do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, o qual tem sua versão mais recente sendo finalizada em 2022; a determinação dos Valores Orientadores (VO) de concentração das Substâncias Químicas de Interesse (SQI); e, por fim, a mais recente Decisão de Diretoria nº038/2017/C.

No estado de São Paulo, a CETESB acompanha, desde 2002, o número, a classificação e as etapas de cada uma das áreas contaminadas ou reabilitadas situadas no estado, as quais fazem parte do Cadastro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas, cuja relação de áreas e respectivas fichas cadastrais são atualizadas e divulgadas anualmente. Sendo assim, o acompanhamento da evolução e do aumento do número de ACs, ao longo dos anos, apontou que, em 2002, foram reconhecidas 255 áreas em processo de GAC, enquanto em 2012, após dez anos, foram registradas 4.572 áreas e, recentemente, a lista da CETESB divulgada em 2020 apontou a existência de 6.434 áreas cadastradas.

Cabe destacar que, dentre as áreas em processo de gerenciamento no estado de São Paulo, 193 áreas correspondem a antigos lixões e até mesmo aos lixões operantes atualmente, dentre os quais se encontra o Lixão Santa Madalena.

3.1.3. Principais Conceitos

Conforme apresentado anteriormente, uma área contaminada pode ser definida como a área onde existe ou existiu fonte de contaminação primária e que contém matéria ou substâncias em, pelo menos, um dos compartimentos ambientais capazes de causar danos aos bens a proteger. Tal definição apresenta conceitos importantes para o GAC, tais como “fonte de contaminação primária”, “compartimentos ambientais” e “bens a proteger”, os quais devem ser corretamente compreendidos para o sucesso e entendimento dos processos envolvidos no gerenciamento de áreas contaminadas. Para o item presente e para o próximo (3.1.4), foram utilizadas as informações disponibilizadas pelo “Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, realizado e atualizado pela CETESB em 2021.

Sendo assim, entende-se por “compartimentos do meio ambiente” os solos, os sedimentos, as rochas, os materiais utilizados para aterrar terrenos, as construções, as águas subterrâneas e superficiais, o ar e os organismos vivos, os quais estão sujeitos às alterações impostas por ocorrências naturais ou atividades antrópicas, que geram fontes de contaminação para o meio ambiente. Tais fontes de contaminação podem ser categorizadas em conformidade com o tipo, com a origem e com a forma de entrada das substâncias nos compartimentos ambientais.

Em relação ao tipo, uma fonte de contaminação pode ser denominada “fonte de contaminação potencial” quando alguma utilidade existente no presente ou no passado tem potencial de liberar quantidades significativas de substâncias para os compartimentos do meio ambiente. Esse tipo de fonte pode se tornar uma “fonte de contaminação primária”, a qual se caracteriza por ser uma utilidade por meio da qual estão sendo ou foram liberadas substâncias para os compartimentos ambientais durante sua utilização ou operação.

Já a “fonte de contaminação secundária” não se configura como uma utilidade, mas como um compartimento do meio ambiente que foi contaminado por substâncias provenientes de fontes de contaminação primárias e que atua como fonte de contaminação para outro compartimento ambiental, devido ao significativo acúmulo das substâncias liberadas pela fonte

primária. Para exemplificar, pode-se citar uma zona não saturada do solo que contenha uma fase retida de substâncias e que pode ser considerada uma fonte secundária de contaminação, uma vez que recebeu as substâncias de uma fonte primária e pode liberar tais substâncias para as águas subterrâneas, agindo, dessa forma, como uma fonte secundária.

Ademais, as fontes de contaminação, em relação à origem, classificam-se como naturais ou antrópicas e, em função da forma de entrada das substâncias no compartimento ambiental, podem ser classificadas como fontes pontuais ou fontes difusas. A primeira classificação – fonte pontual – diz respeito a uma fonte que libera substâncias em uma área relativamente pequena, enquanto, na segunda classificação – fonte difusa – a fonte de contaminação se caracteriza por liberar substâncias em áreas extensas, atingindo as grandes propriedades e até mesmo as propriedades circunvizinhas.

Dadas as definições de compartimento do meio ambiente e as classificações das fontes de contaminação, pode-se definir o conceito de “bens a proteger”. Os bens a proteger, tais como a saúde, a vida humana e os bens públicos, privados, coletivos ou ambientais, estão presentes na maioria das áreas contaminadas ou em sua vizinhança e podem ser expostos às “substâncias químicas de interesse” (SQI), que geram contaminação e danos aos bens a proteger, caracterizando um evento de exposição. A definição de “exposição”, por sua vez, pode ser entendida como o contato dos contaminantes com os bens a proteger, podendo ser classificada como uma “exposição potencial” – quando existe a possibilidade da exposição – ou como uma “exposição real” – quando o contato ocorre de fato.

A partir de um cenário de exposição do bem a proteger, potencial ou real, a uma determinada SQI presente no compartimento do meio ambiente, pode-se definir o que a CETESB denomina como “risco” como “a probabilidade ou a possibilidade de ocorrência de um dano”. O “dano”, por sua vez, pode ocorrer devido à exposição real de um bem a proteger à uma SQI e pode ser entendido como “a ocorrência de um efeito adverso a um bem a proteger, o qual provoca a perda de sua função ou utilidade, ou até mesmo a sua destruição”.

Assim, o risco pode ser classificado como um “risco crônico”, quando a exposição às baixas concentrações de SQI ocorre ao longo de um período ou ao longo de anos, enquanto o “risco agudo” é caracterizado pela exposição às altas concentrações de SQI em um período relativamente curto. A partir de tais definições também se conceitua o “nível de risco aceitável”, o qual “é definido em função das características do bem a proteger [...], bem como dos efeitos tóxicos carcinogênicos ou não carcinogênicos da SQI”. O nível aceitável de risco pode ser

expresso como “concentração máxima aceitável” (CMA) de uma substância química de interesse em contato com o bem a proteger ou em um determinado compartimento do meio ambiente, o qual, normalmente, é determinado na etapa de Avaliação de Risco.

A partir da breve descrição dos conceitos apresentados anteriormente, pode-se obter uma compreensão mais apurada dos processos envolvidos no GAC, bem como da nomenclatura utilizada para referenciar os principais aspectos de importância no gerenciamento de uma área contaminada. A seguir, estão apresentadas as diferentes etapas que compõem o GAC e que são necessárias à reabilitação de uma AC e o seu uso seguro.

3.1.4. Etapas do GAC

Conforme mencionado anteriormente, o gerenciamento de áreas contaminadas se subdivide em dois processos distintos, que têm por objetivo final subsidiar a reabilitação de uma área contaminada. Tais processos são nomeados Processo de Identificação de Áreas Contaminadas e Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas e cada um deles abrange cinco etapas específicas que possuem metodologias criteriosas, conforme será apresentado a seguir.

A. Processo de Identificação de Áreas Contaminadas

A1. Identificação das Áreas com Potencial de Contaminação

Todo o processo do GAC se inicia pela Identificação das Áreas com Potencial de Contaminação, etapa que tem por objetivo identificar, em uma região de interesse, áreas nas quais podem existir ou terem existido fontes de contaminação potenciais. Tais áreas podem ser classificadas como Áreas Potencialmente Contaminadas (AP), sendo de responsabilidade do órgão ambiental gerenciador do GAC a execução dessa etapa.

Nela ocorre o cruzamento de informações a respeito das atividades econômicas desenvolvidas na área com a relação de atividades potencialmente geradoras de AC, subsidiando a identificação das APs. Nessa etapa, normalmente, um grande número de APs é verificado, sendo muitas vezes necessária a priorização de tais áreas. Assim, as APs classificadas como prioritárias têm seus responsáveis legais notificados e demandados a realizar a etapa seguinte do GAC.

A2. Avaliação Preliminar

A segunda etapa do processo de identificação é nomeada Avaliação Preliminar e tem como objetivo principal identificar fatos, evidências, indícios ou até mesmo as incertezas relativas à suspeita de contaminação dos compartimentos ambientais. Tal etapa consiste na realização de levantamentos de informações em documentos pré-existentes que relatem o histórico da área, bem como no estudo das atividades desenvolvidas no presente. Além disso, pode-se realizar entrevistas com os responsáveis pela área em avaliação, assim como inspeções presenciais de reconhecimento da área podem ser realizadas nessa etapa.

A partir dos mecanismos apresentados acima e ferramentas de avaliação, caso sejam identificados fatos, evidências, indícios ou até mesmo incertezas que levem a suspeitar da existência de contaminação, a área avaliada tem sua classificação alterada de AP para AS – Área Suspeita de Contaminação – sendo necessária a continuidade do GAC que é direcionado para a próxima etapa: Investigação Confirmatória. Algumas das principais atividades desenvolvidas na Avaliação Preliminar são, entre outras:

- Identificação de fontes de contaminação potenciais;
- Verificação da possibilidade de contaminação proveniente de fontes externas à área em avaliação;
- Identificação dos bens a proteger;
- Definição do Modelo Conceitual Inicial da Área (MCA 1);
- Verificação da necessidade de realizar a etapa de Investigação Confirmatória e, caso necessário, elaboração de um plano preliminar para essa etapa.

A3. Investigação Confirmatória

Já a investigação confirmatória ocorre em áreas classificadas como AS e tem como objetivo geral confirmar ou não a existência de contaminação dos compartimentos do meio ambiente, a qual normalmente tem sua origem nas fontes de contaminação primárias situadas dentro dos limites da área em avaliação. Para isso, métodos diretos e indiretos de investigação são utilizados em pontos estratégicos dos compartimentos ambientais, onde há suspeita de contaminação. Os métodos diretos consistem na obtenção de amostras do compartimento de interesse para que sejam determinadas as concentrações das SQIs nele presentes.

Caso a contaminação seja confirmada nesta etapa em pelo menos um dos compartimentos avaliados, a área passa a ser classificada como Área Contaminada sob Investigação (ACI). Algumas das principais atividades desenvolvidas na Investigação Confirmatória são, entre outras:

- Elaboração e execução do plano definitivo de Investigação Confirmatória;
- Identificação dos caminhos de exposição;
- Definição do segundo Modelo Conceitual da Área (MCA 2)
- Verificação da necessidade de prosseguir com o GAC, a partir da confirmação da existência de contaminação ou ausência dessa;
- Proposição de um plano preliminar para a Investigação Detalhada, se necessário.

A4. Investigação Detalhada

A Investigação Detalhada ocorre em áreas classificadas como ACI – identificadas na etapa de Investigação Confirmatória – e tem como objetivo caracterizar as fontes de contaminação primárias e as plumas de contaminação presentes nos compartimentos ambientais. É importante destacar que os trabalhos desenvolvidos em uma investigação detalhada compreendem tanto a coleta de dados, quanto a interpretação das informações obtidas nessa etapa e nas etapas anteriores. Dessa forma, são possibilitadas a caracterização da distribuição da massa de contaminantes ou concentração das SQI e a determinação de seus limites e dinâmicas de propagação nos compartimentos contaminados.

Tal investigação proporciona resultados de extrema importância para as próximas etapas, especialmente para a Avaliação de Risco à Saúde Humana e para o segundo conjunto de ações do GAC – Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas. Algumas das principais atividades desenvolvidas na Investigação Detalhada são, entre outras:

- Elaboração e execução do plano definitivo de Investigação Detalhada;
- Descrição das características das fontes de contaminação primária e secundária e das plumas de contaminação;
- Definição do terceiro Modelo Conceitual da Área (MCA 3);
- Verificação da necessidade de continuidade do GAC;

- Proposição de um plano preliminar de execução da Avaliação de Risco à Saúde Humana.

O conteúdo mínimo do relatório da Investigação Detalhada, de acordo com a DD 38/2017, é apresentado no Anexo II.

A5. Avaliação de Risco

A última etapa do Processo de Identificação de Áreas Contaminadas é a realização da Avaliação de Risco, a qual tem como principal objetivo definir se há necessidade de implementação de medidas de intervenção na área em avaliação ou em sua vizinhança, visando viabilizar o uso seguro do terreno contaminado. Esta etapa é realizada para identificar e caracterizar os riscos acima dos níveis aceitáveis e os danos gerados a partir de um cenário de exposição dos bens a proteger às SQL.

Quando, nessa etapa ou nas etapas anteriormente apresentadas, forem identificadas fontes de contaminação primária ou secundária ativas ou forem identificados riscos aos bens a proteger acima dos níveis aceitáveis ou ainda forem identificados danos aos bens a proteger, faz-se necessária a continuidade do GAC, isto é, a elaboração de um Plano de Intervenção e posterior realização do Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas. Dessa forma, a área em avaliação passa a ser classificada como Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi). Algumas das principais atividades desenvolvidas na Avaliação de Risco são, entre outras:

- Elaboração e execução do plano definitivo de Avaliação de Risco;
- Identificação e caracterização dos bens a proteger, dos caminhos de exposição, dos riscos e dos danos aos bens a proteger;
- Definição do quarto Modelo Conceitual da Área (MCA 4);
- Verificação da necessidade da continuidade do GAC.

Cabe mencionar que, em alguns casos, quando não há a confirmação de riscos acima dos limites aceitáveis ou danos aos bens a proteger, a gestão da área também é encaminhada para o Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas. Contudo, a área avaliada é encaminhada diretamente para a etapa de Monitoramento para Encerramento.

O conteúdo mínimo do relatório da Avaliação de Risco, de acordo com a DD 38/2017, é apresentado no Anexo III.

B. Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas

Realizado o Processo de Identificação das Áreas Contaminadas, caso as etapas apresentadas anteriormente indiquem a necessidade de reabilitação da área avaliada, inicia-se o Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas, o qual tem sua primeira etapa nomeada Elaboração do Plano de Intervenção.

B1. Elaboração do Plano de Intervenção

O Plano de Intervenção consiste em um documento no qual são definidas e planejadas as medidas de intervenção a serem adotadas com a finalidade de viabilizar o uso seguro da ACRi e de sua circunvizinhança, tornando-a uma Área Reabilitada (AR). Basicamente, essa etapa define os reais objetivos do plano de intervenção, bem como define as medidas a serem adotadas, selecionando as técnicas mais adequadas para serem empregadas. Para isso, utiliza-se as informações contidas no MCA4 que subsidiam a escolha das ações que serão determinadas no plano de intervenção. Algumas das principais atividades desenvolvidas na Elaboração do Plano de Intervenção são, entre outras:

- Definição das medidas de intervenção a serem adotadas;
- Seleção de técnicas adequadas;
- Descrição do Plano de Intervenção;
- Definição do quinto Modelo Conceitual da Área (MCA 5);
- Verificação da necessidade de continuidade do GAC.

B2. Execução do Plano de Intervenção

Após a elaboração do plano de intervenção, as medidas técnica e economicamente escolhidas devem ser implementadas na ACRi visando a reabilitação da área para que essa possa ser utilizada de forma segura. As principais ações previstas em planos de intervenção são a implementação, operação e avaliação do desempenho das medidas de remediação por tratamento ou contenção; a implantação das medidas de controle de engenharia; e, por fim, a implantação das medidas de controle institucional. Nessa etapa, a área passa a ser classificada como Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe), quando a medida de remediação

prevista no plano de intervenção é iniciada. Algumas das principais atividades desenvolvidas na Execução do Plano de Intervenção são, entre outras:

- Implementação das medidas de remediação, de controle de engenharia e de controle institucional previstas no Plano de Intervenção;
- Elaboração do sexto Modelo Conceitual da Área (MCA 6);
- Verificação da necessidade da continuidade do GAC.

B3. Monitoramento para Encerramento

Implementadas as medidas cabíveis à área em avaliação, a gestão da AC segue para a próxima etapa: Monitoramento para Encerramento, classificando a área como Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME). Tal etapa tem como finalidade verificar a manutenção do cenário obtido após a implementação do plano de intervenção, configurando-se como uma condição necessária para possibilitar que a área seja classificada como Área Reabilitada (AR). Para isso, campanhas de monitoramento são executadas para verificar a conformidade das medidas empregadas. Algumas das principais atividades desenvolvidas no Monitoramento para Encerramento são, entre outras:

- Realização de campanhas de monitoramento nos pontos de conformidade;
- Proposição da nova classificação da área em avaliação;
- Definição do sétimo Modelo Conceitual da Área (MCA 7);
- Verificação da necessidade de continuidade do GAC.

B4. Emissão do Termo de Reabilitação para o Uso Declarado

Caso as campanhas de monitoramento realizadas na etapa anterior comprovem a classificação da área em avaliação como AR, o Termo de Reabilitação para o Uso Declarado deve ser emitido nessa etapa, a qual é nomeada Emissão do Termo de Reabilitação para o Uso Declarado. A responsabilidade da emissão desse documento é do órgão ambiental gerenciador, o qual deve receber os documentos e informações pertinentes que comprovem a reabilitação da área e que devem ser fornecidos pelo responsável legal. Algumas das principais atividades

desenvolvidas na etapa de emissão do termo de reabilitação para o uso declarado são, entre outras:

- Descrição do conteúdo do Termo de Reabilitação para o Uso Declarado;
- Consolidação do oitavo Modelo Conceitual da Área (MCA 8);
- Verificação da necessidade de continuidade do GAC.

B5. Acompanhamento da Medida de Controle de Engenharia ou da Medida de Controle Institucional

Por fim, essa etapa se configura como a última etapa do Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas, tendo como principais objetivos o acompanhamento e a verificação da eficácia das medidas de controle de engenharia e/ou das medidas de controle institucional implementadas na área em avaliação, determinando o encerramento do GAC ou a sua continuidade. Algumas das principais atividades desenvolvidas no acompanhamento são, entre outras:

- Avaliação da eficácia da medida de controle de engenharia e/ou da medida de controle institucional;
- Definição do nono Modelo Conceitual da Área (MCA 9);
- Consolidação da classificação da área como Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR);
- Verificação da necessidade de continuidade do GAC.

Assim, configuram-se as etapas do GAC, as quais se sucedem, subsidiando a etapa posterior com informações cada vez mais detalhadas e compondo um processo técnico e administrativo previsto na legislação federal. A Figura 1, apresentada a seguir, resume esquematicamente o processo de gerenciamento de áreas contaminadas.

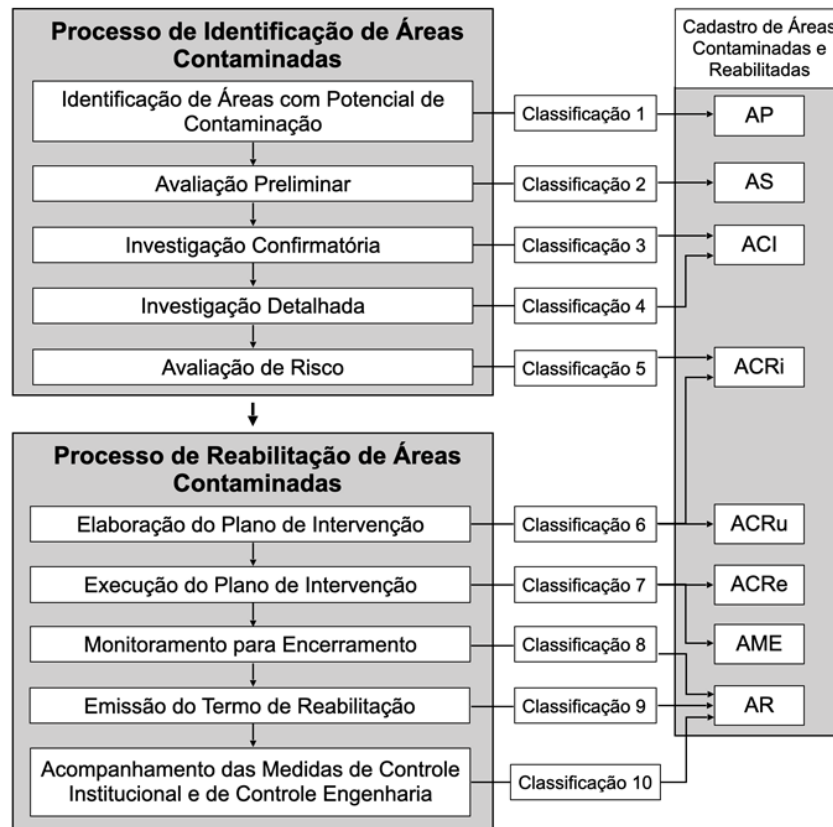


Figura 1- Fluxograma do Gerenciamento de Áreas Contaminadas
 Fonte: Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2021)

3.2. O Lixão Santa Madalena e o GAC

Em consulta à relação de áreas contaminadas e reabilitadas cadastradas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, em 2021, foi verificado o cadastro do antigo Lixão Santa Madalena, o qual é nomeado pela CETESB como Lixão Fazenda Santa Madalena. Conforme exposto anteriormente, a área do antigo lixão se situa na referida fazenda, na zona rural do município de São Carlos/SP, e abrigou a operação do lixão em estudo, isto é, a disposição inadequada de resíduos sólidos, durante décadas. A ficha cadastral dessa área contaminada apresenta as coordenadas da localização exata do antigo lixão, as quais se encontram no Datum SAD69 e apresentam as seguintes longitude e latitude, respectivamente: UTM_E 210.124,00 e UTM_N 7.555.164,00.

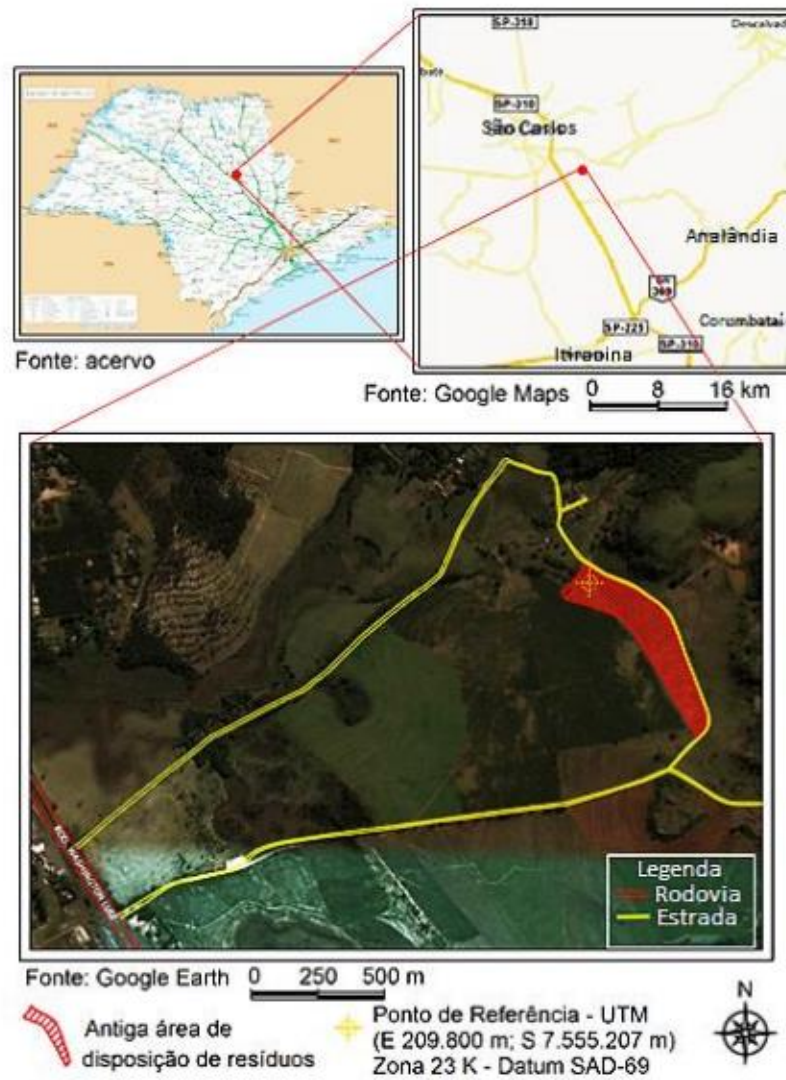


Figura 2 - Localização do Lixão Santa Madalena

Fonte: Shinzato (2014)

A partir da análise da ficha cadastral do antigo Lixão Santa Madalena, é possível verificar que atualmente a área é classificada como uma Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi), ou seja, a área foi investigada, ao menos, até a etapa de Avaliação de Risco à Saúde Humana, a qual apontou a existência de risco aos seres humanos, devido às concentrações de contaminantes que foram verificadas ao longo dos estudos. Tal afirmação é confirmada por meio das informações contidas na própria ficha cadastral da CETESB, a qual aponta que o GAC foi executado desde as etapas iniciais do processo até a Elaboração do Plano de Intervenção, passando por todas as etapas anteriores, conforme apresentado no subitem 3.1.4. Dessa forma, verifica-se que o antigo Lixão Santa Madalena foi alvo das etapas de Identificação, Avaliação Preliminar, Investigação Confirmatória, Investigação Detalhada, Análise de Risco e Plano de Intervenção. Segundo a lista de áreas contaminadas da CETESB, apenas o Antigo Lixão da Codesp, em Santos, está reabilitado para uso declarado. Outros lixões

que estão avançados no GAC são: Lixão de Pilões, em Cubatão; Lixão da Areia Branca, em Espírito Santo do Pinhal e o Antigo Lixão de Rio Claro, com os três sendo classificados como ACRE.

Verifica-se, também, que a existência do lixão, juntamente com a ausência de medidas de remediação na área em questão, provocou impactos negativos aos compartimentos do meio ambiente. Tais compartimentos afetados são o subsolo e as águas superficiais e subterrâneas, sendo que o subsolo foi afetado somente dentro da propriedade, enquanto as águas – superficiais e subterrâneas – foram também afetadas fora da propriedade, isto é, os contaminantes liberados pelo antigo lixão foram transportados, através dos compartimentos ambientais e por meio de agentes naturais, até áreas externas à Fazenda Santa Madalena. Os contaminantes supramencionados, que foram identificados durante o gerenciamento da área em avaliação, correspondem aos metais e aos componentes microbiológicos.

A ficha cadastral da área em questão ainda revela que algumas medidas emergenciais foram realizadas, como o isolamento da área e a proibição de acesso e o fechamento e interdição dos poços de abastecimento, bem como o monitoramento ambiental. Além disso, como medida de controle institucional, foi realizada a restrição do uso das águas subterrâneas e superficiais. Entretanto, nenhuma medida de remediação foi implantada na área, tampouco medidas de controle de engenharia, como pode ser observado na ficha de cadastro do antigo lixão disponibilizada no Anexo I deste estudo.

Como uma importante e essencial parte deste trabalho de graduação, a fim de alcançar com sucesso os objetivos desejados, foi obtido e avaliado o Relatório Final da empresa Geoambiente, elaborado em janeiro de 2011, o qual apresenta as atividades e resultados obtidos por meio das etapas de Investigação Detalhada e de Avaliação de Risco à Saúde Humana, bem como apresenta as recomendações de medidas de intervenção, as quais foram elaboradas para a área correspondente ao antigo e desativado Lixão Santa Madalena e seu entorno.

Com o objetivo de proporcionar o pleno entendimento das referências que estão sendo utilizadas neste estudo, deve-se considerar a nomenclatura “Relatório Final” para a referência do relatório que abrange as últimas etapas do GAC que foram realizadas na área-objeto de estudo. Quando necessário, as etapas serão mencionadas separadamente, considerando-se as seguintes abreviações: ID – Investigação Detalhada – e ARSH – Avaliação de Risco à Saúde Humana.

O Relatório Final foi realizado com base na integração de dados geofísicos, geológicos, geoquímicos, hidrogeológicos e hidroquímicos que foram adquiridos entre novembro de 2009 e dezembro de 2010, isto é, há cerca de uma década, relativamente ao ano de elaboração do presente estudo.

Cabe mencionar que, para a realização das atividades pertinentes às diferentes etapas do GAC e elaboração do Relatório Final, a empresa Geoambiente tomou como base o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB vigente na época, o qual sofreu alterações e atualizações ao longo dos anos, e que tem sua última versão sendo atualizada em 2022. Além disso, a empresa também utilizou como base a Decisão de Diretoria nº103/2007/C da CETESB, a qual não se encontra vigente atualmente e que foi substituída pela Decisão de Diretoria nº038/2017/C.

Tendo em vista tais mudanças nas diretrizes do GAC no estado de São Paulo, o presente estudo tem como um de seus objetivos realizar uma análise crítica das atividades realizadas na época da elaboração do Relatório Final em relação às exigências das novas e atuais diretrizes da CETESB. Para tal, faz-se necessária uma breve apresentação das atividades que foram realizadas entre os anos 2009 e 2011 pela empresa Geoambiente, a qual está subdividida em Etapas Anteriores, ID, ARSH, Medidas de Intervenção e Recomendações, conforme pode ser observado a seguir.

3.2.1. Etapas Anteriores

O capítulo 6 do Relatório Final apresenta um breve resumo do histórico de serviços ambientais executados pela Geoambiente na área em avaliação, por meio do qual foi possível compreender que foram elaborados relatórios bimestrais de Investigação Detalhada e Avaliação de Risco, de novembro de 2009 a dezembro de 2010. Assim, o Relatório Final contempla uma compilação dos relatórios bimestrais, apresentando os principais resultados neles obtidos. A seguir, estão brevemente apresentadas as atividades realizadas para a elaboração de cada um dos relatórios parciais.

O primeiro relatório bimestral, de novembro de 2009, contemplou as informações obtidas no reconhecimento presencial da área, bem como a identificação das vias de acesso, a localização dos poços de monitoramento existentes, a medição do nível d'água e da profundidade dos poços, o levantamento topográfico preliminar da área e o levantamento geofísico preliminar por meio do método de eletrorresistividade.

O segundo relatório parcial, apresentado em janeiro de 2010, foi elaborado com informações do levantamento histórico dos serviços de diagnóstico ambiental realizados na área e contemplou os estudos geológicos e hidrogeológicos regionais e locais, a programação dos trabalhos de sondagem e de instalação de poços de monitoramento, bem como definiu um plano de amostragem.

Já o terceiro relatório abordou a caracterização do entorno da área avaliada, a realização de 10 sondagens ambientais de reconhecimento e as amostragens de solo. Além disso, apresentou a caracterização do meio físico a partir de investigações intrusivas diretas, com descrição do perfil pedológico *in situ*, as avaliações qualitativas das concentrações de compostos orgânicos voláteis na zona aerada do solo em profundidade, as análises táteis e visuais da eventual presença de indícios de contaminação no solo e na água subterrânea, a instalação de 10 poços de monitoramento e a coleta de 18 amostras de água subterrânea. Vale mencionar que foi realizado o monitoramento de parâmetros *in situ* nos poços de monitoramento instalados anteriormente, bem como foram realizadas a amostragem de água subterrânea de 4 poços artesianos existentes no entorno e a coleta de amostras de água superficial, sendo uma nascente situada à montante da área. A localização dos poços de monitoramento, pontos de amostragem (Figura 3) e sondagens (Figura 4) são apresentados abaixo.

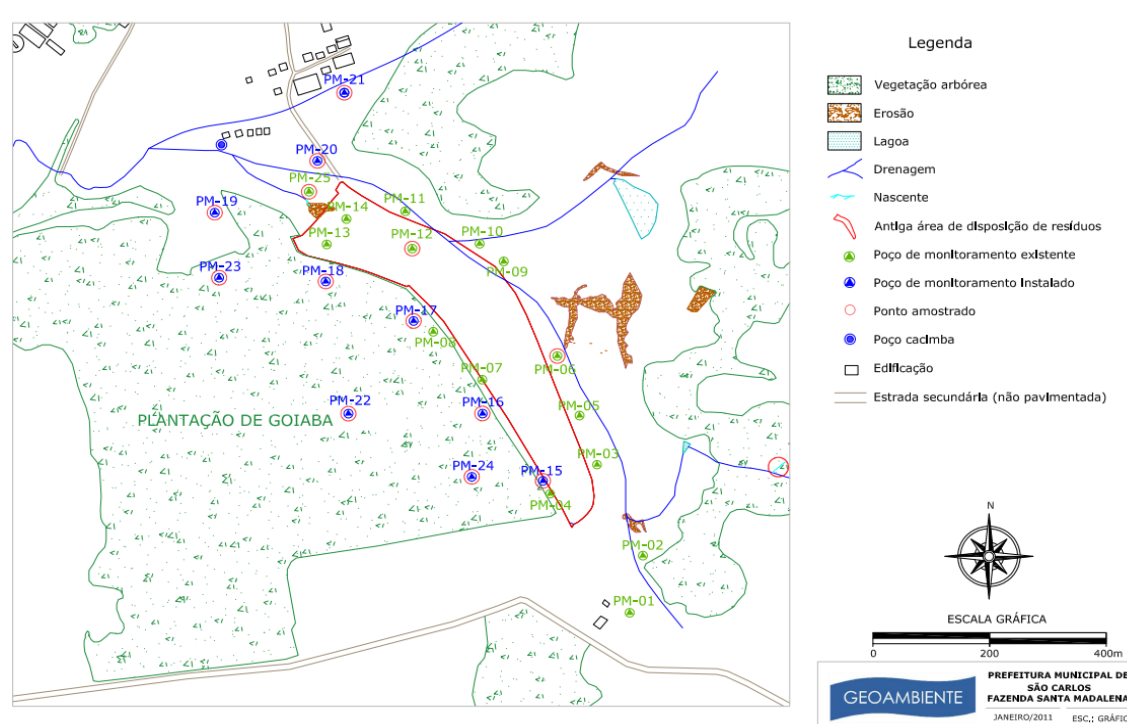


Figura 3- Localização dos poços de monitoramento existentes e instalados em julho de 2010

Fonte: PMSC (2010)

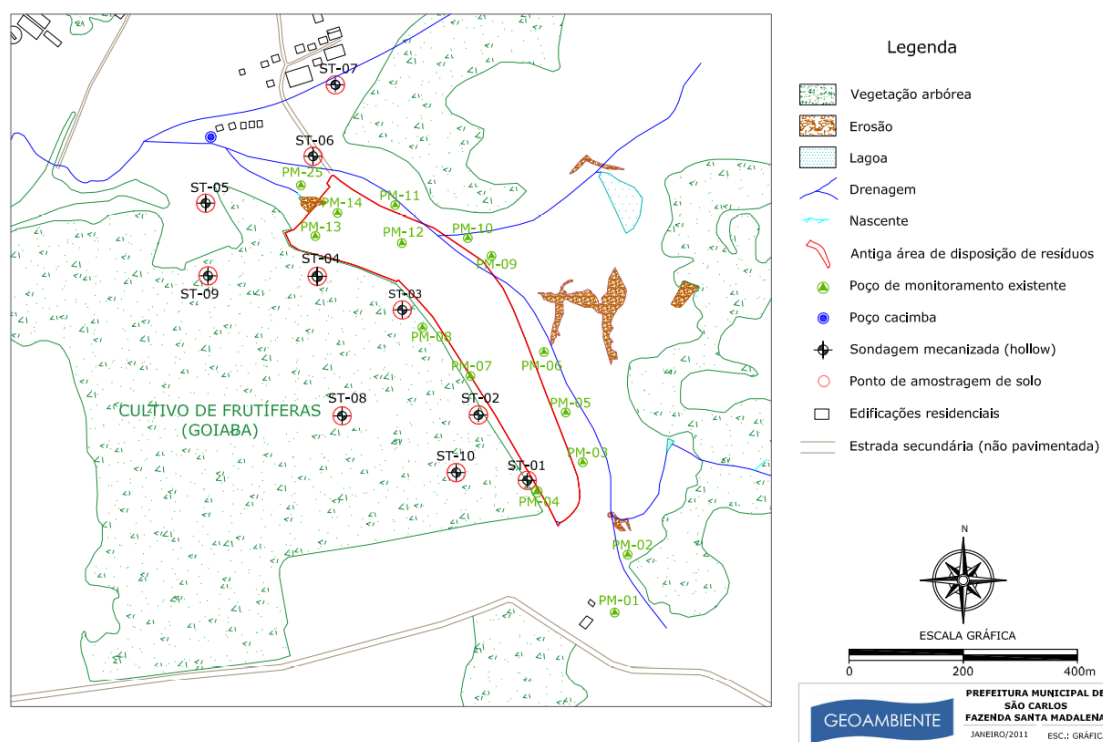


Figura 4- Localização dos poços de monitoramento e pontos de sondagem
Fonte, PMSC (2010)

O quarto relatório, por sua vez, apresentou os resultados laboratoriais das amostragens realizadas nos poços de monitoramento existentes e nos poços instalados na época do estudo. Já o quinto relatório apresentou informações a respeito da instalação de dois poços multi-níveis, possibilitando a investigação das plumas de contaminação identificadas em profundidade. Por fim, o sexto e último relatório parcial abordou os serviços de amostragem dos poços de monitoramento e dos poços multi-níveis instalados, cujas coletas foram obtidas por meio do método de baixa vazão (*Low Flow*).

Sendo assim, o Relatório Final, apresentou de maneira resumida todas as atividades supracitadas, assim como apresentou os “*serviços realizados na etapa atual*”, em seu capítulo 7, que abrange as atividades descritas nos subitens a seguir.

3.2.2. Investigação Detalhada

A etapa do GAC que corresponde à Investigação Detalhada realizada na área-objeto de estudo teve como principal objetivo a identificação da concentração de compostos orgânicos e metais, por meio de análises laboratoriais, que eventualmente estariam presentes no solo e na

água subterrânea “de modo a concluir a respeito da existência ou não de passivo ambiental” (PMSC, 2011).

Para a finalidade proposta, foram realizadas, em dezembro de 2010, 02 (duas) sondagens de reconhecimento para a instalação de poços multi-níveis, por meio de sondagem rotativa *DirectPush*, totalizando 100 metros de sondagens executadas e de poços instalados. Tais sondagens proporcionaram a coleta de amostras de solo e a consequente descrição litológica do perfil do solo local. Além disso, leituras de compostos orgânicos voláteis (VOC) foram realizadas na zona aerada do solo.

Com o objetivo de avaliar a qualidade ambiental das águas subterrâneas, foram coletadas 20 amostras provenientes de 11 poços de monitoramento, por meio do método de baixa vazão, bem como foram coletadas 02 (duas) amostras de água superficial obtidas na nascente situada à montante da área e em um ponto de coleta situado à jusante dos corpos d’água existentes na região, conforme representado na Figura 5. A leitura de parâmetros *in situ* foi realizada por meio de sonda multiparâmetros e as amostras coletadas foram acondicionadas adequadamente e encaminhadas ao laboratório *Analytical Solutions* para a análise de compostos orgânicos semivoláteis (SVOC), voláteis (VOC) e dos metais prioritários da lista da CETESB.

A caracterização hidrogeológica local foi possibilitada a partir dos dados obtidos em campo e trabalhos realizados anteriormente, a qual revelou que o aquífero local apresenta comportamento livre e é suscetível às alterações climáticas e pluviométricas. As cargas hidráulicas foram obtidas a partir da medição das cotas topográficas dos poços de monitoramento e da medição do nível d’água de cada poço, o que possibilitou a elaboração do mapa potenciométrico da área. Foram realizados dois mapas potenciométricos (Figuras 6 e 7), ambos indicando que o sentido preferencial do fluxo das águas subterrâneas é na direção noroeste. Além do mais, foi verificado que o lençol freático variou de 1,38 a 27,67m de profundidade e que os poços de monitoramento localizados próximos e no interior do antigo lixão apresentam níveis mais rasos, os quais podem estar condicionados à massa de resíduos.

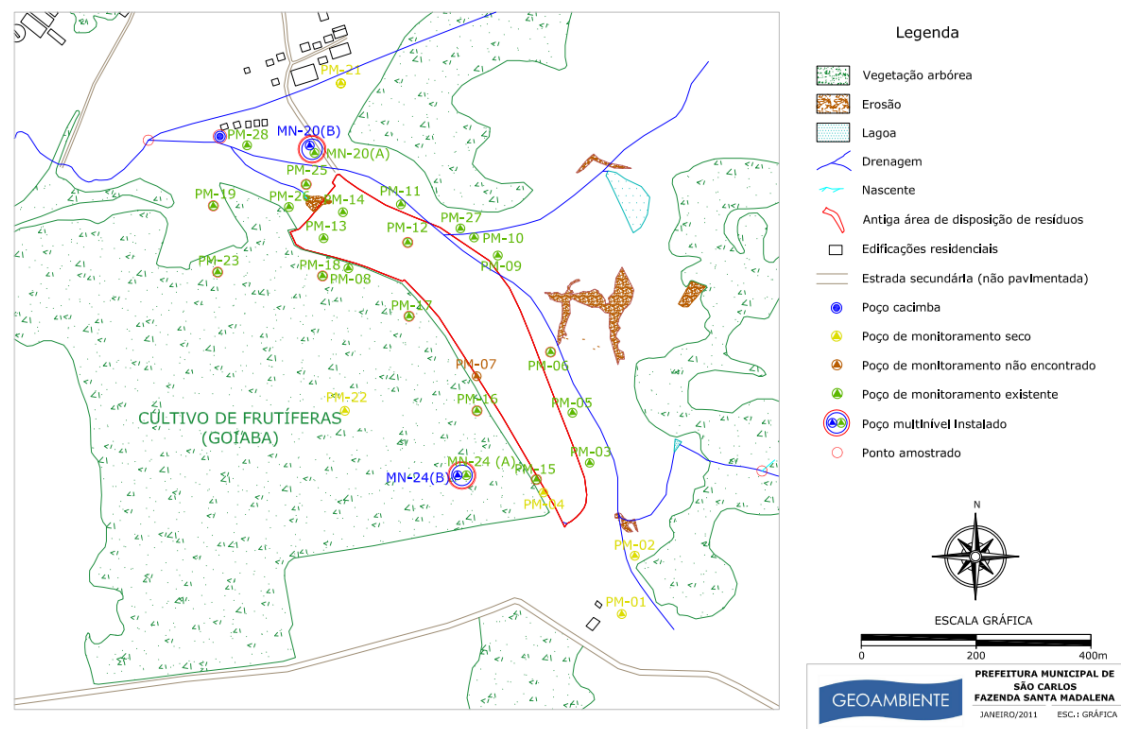


Figura 5- Localização dos poços de monitoramento, poços multiníveis e coleta de água superficial
Fonte: PMSC (2010)

A caracterização hidrogeológica local foi possibilitada a partir dos dados obtidos em campo e trabalhos realizados anteriormente, a qual revelou que o aquífero local apresenta comportamento livre e é suscetível às alterações climáticas e pluviométricas. As cargas hidráulicas foram obtidas a partir da medição das cotas topográficas dos poços de monitoramento e da medição do nível d'água de cada poço, o que possibilitou a elaboração do mapa potenciométrico da área. Foram realizados dois mapas potenciométricos (Figuras 6 e 7), ambos indicando que o sentido preferencial do fluxo das águas subterrâneas é na direção noroeste. Além do mais, foi verificado que o lençol freático variou de 1,38 a 27,67m de profundidade e que os poços de monitoramento localizados próximos e no interior do antigo lixão apresentam níveis mais rasos, os quais podem estar condicionados à massa de resíduos.

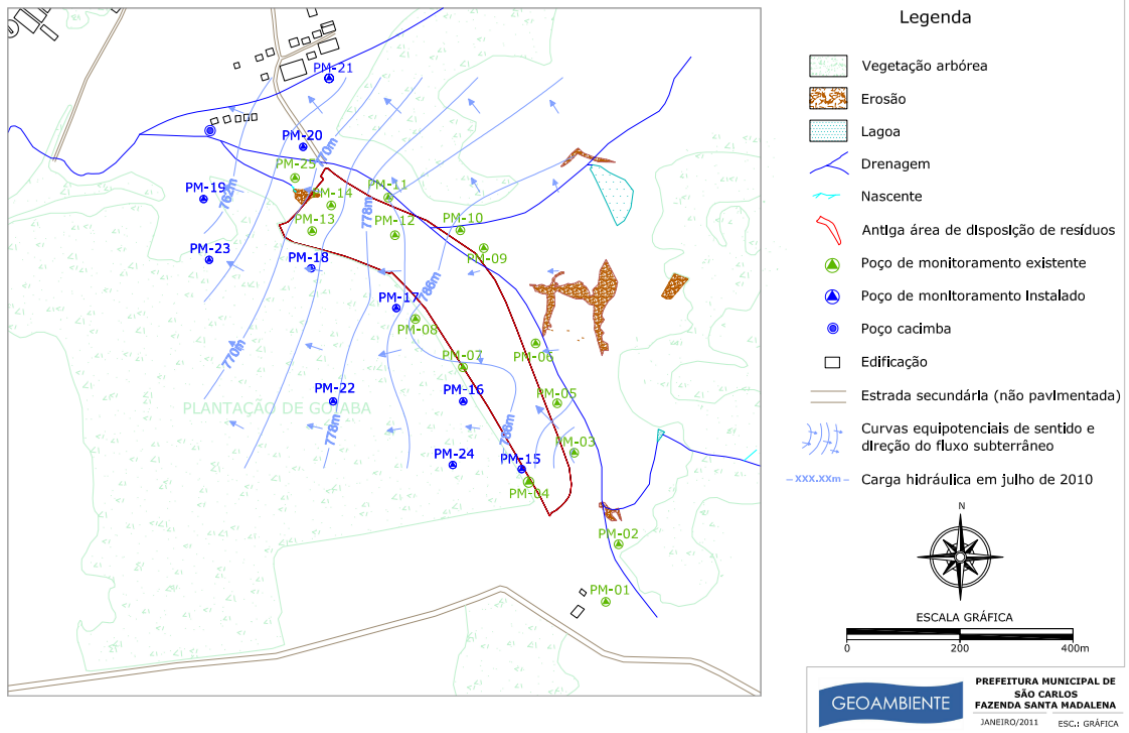


Figura 6 - Mapa Potenciométrico (julho de 2010)
Fonte: PMSC (2010)

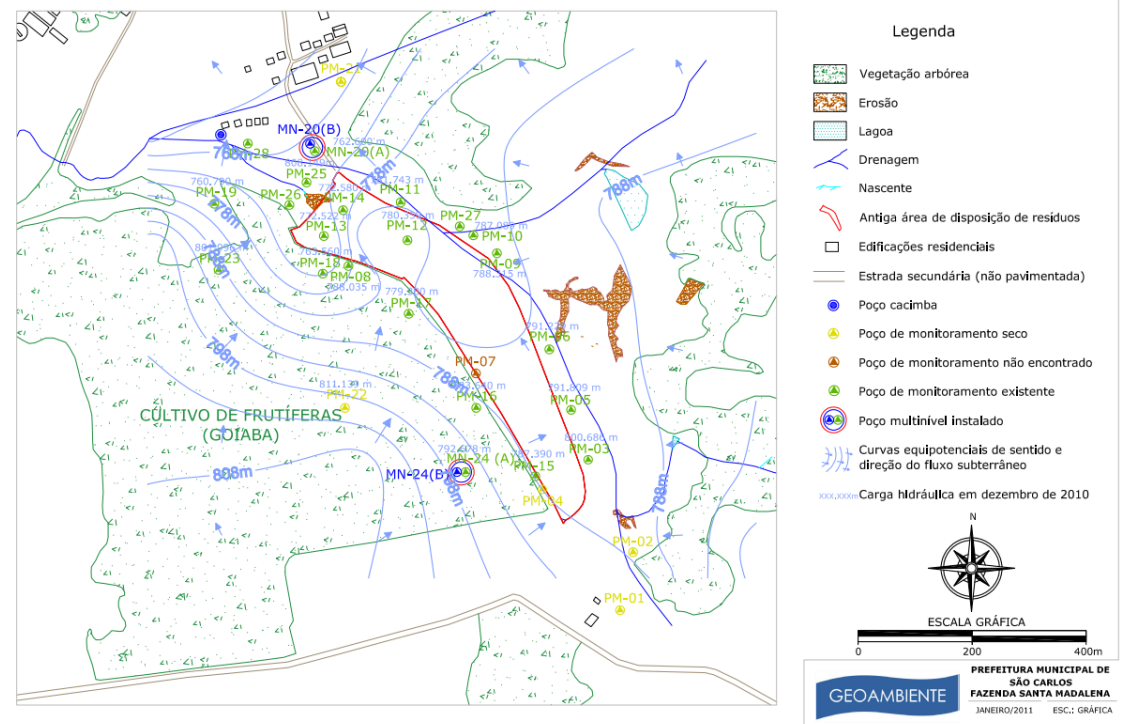


Figura 7- Mapa Potenciométrico (dezembro de 2010)
Fonte: PMSC (2010)

Os resultados obtidos nessa etapa foram graficamente apresentados e também puderam ser visualizados por meio do mapeamento das plumas de contaminação, conforme pode ser visualizado nas Figuras 8 e 9. Também foram apresentadas tabelas com os principais compostos

analisados, sendo possível destacar que na água subterrânea, os VOC e SVOC indicaram concentrações abaixo do limite de detecção, enquanto a análise analítica de metais na água subterrânea indicou concentrações acima dos valores de intervenção, sendo demonstrado abaixo na Figura 10. Por fim, o Relatório Final também contemplou perfis e seções pedológicas/geológicas como resultados visuais das informações adquiridas ao longo da etapa. As seções pedológicas indicam o substrato, nível d'água, profundidade e o perfil esquemático dos poços, como pode ser observado na Figura 11.

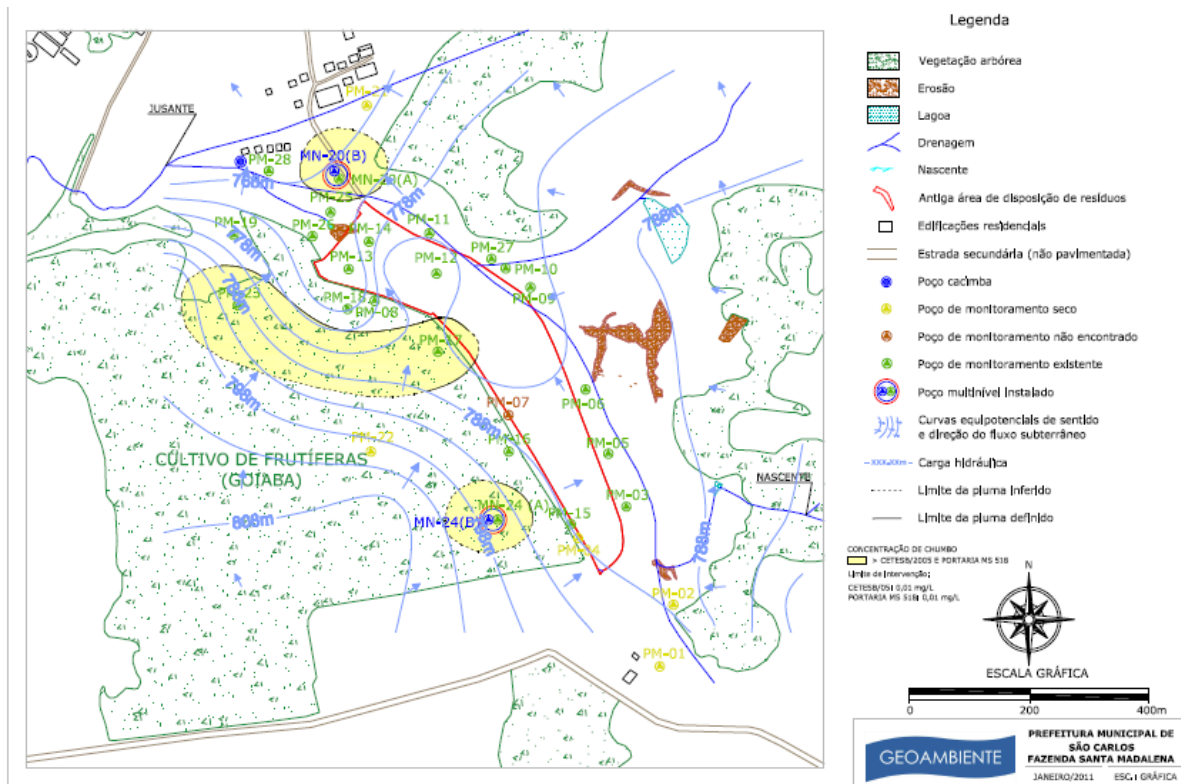


Figura 8 - Pluma de contaminação por chumbo

Fonte: PMSC (2010)

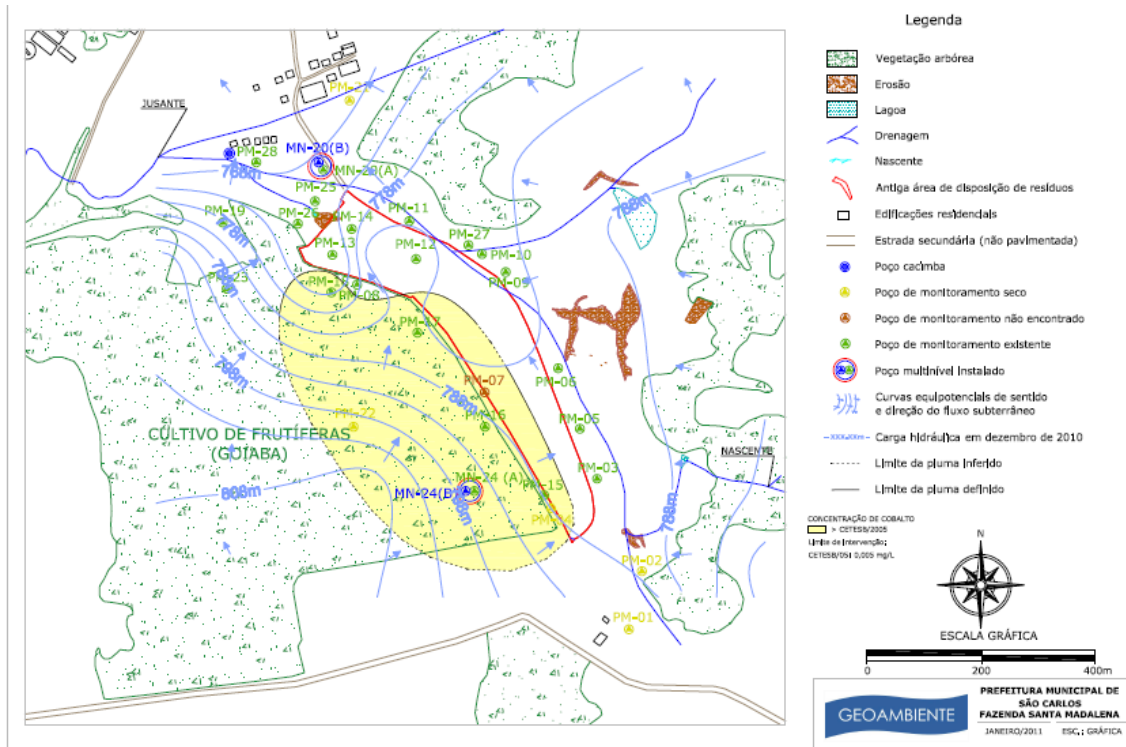


Figura 9 - Pluma de contaminação por cobalto
 Fonte: PMSC (2010)

Tabela 9.2.3 - Resultados Analíticos de Metais na Água Subterrânea (mg/L)

Compostos	PM-06		PM-12		PM-15		PM-16		PM-17		PM-18		PM-19		PM-21		PM-22		PM-23		PM-25		LD	Valor de Referência	
	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	jul/10	dez/10	CE	MS			
	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido	Intervenção	Permitido		Intervenção	Permitido
Alumínio (Al)	0,03	0,104	0,03	nd	0,03	nd	0,09	nd	0,16	nd	0,07	1,291	0,29	0,309	0,04		0,18		0,29	0,322	0,02	nd	0,01	0,2	-
Antimônio (Sb)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,004	nd	0,013	nd	0,009	nd	0,008	nd	0,015		0,019		nd	nd	nd	nd	0,002	0,005	0,005
Arsênio (As)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,013	nd	0,119	0,03	0,0968	0,06	nd	0,03		nd	nd	nd	nd	0,002	0,01	0,01	
Bário (Ba)	0,05	0,0765	0,08	0,0922	1,27	0,0236	0,47	0,0442	0,02	0,119	0,03	0,0968	0,06	nd	0,03		0,16		0,06	0,0605	0,09	0,0812	0,002	0,7	0,7
Boro (B)	nd	nd	0,03	nd	0,56	0,597	1,2	0,262	nd	0,026	0,12	0,126	nd	nd	0,03		0,16		nd	0,0231	0,04	0,0235	0,005	-	-
Cádmio (Cd)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,001	nd	0,001		nd	nd	nd	nd	0,0003	0,005	0,005	
Chumbo (Pb)	0,017	nd	0,008	nd	0,021	nd	0,006	nd	0,015	0,156	0,007	nd	0,02	nd	0,042		0,02		0,022	0,032	0,008	nd	0,002	0,01	0,01
Cobalto (Co)	0,002	nd	nd	nd	0,074	0,223	0,079	0,086	0,003	0,014	0,003	0,049	0,005	nd	0,003		0,025		0,006	nd	0,02	nd	0,001	0,005	-
Cobre (Cu)	0,003	nd	0,001	nd	nd	nd	nd	nd	0,008	nd	0,005	nd	0,003	nd	nd		0,007		0,003	nd	nd	nd	0,001	2	2
Cromo (Cr)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,017	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,001	SECO	nd	SECO	nd	nd	0,006	nd	0,005	0,05	-
Ferro (Fe)	0,02	nd	0,06	nd	nd	29,02	6,78	9,027	nd	nd	0,1	nd	0,02	nd	1,43		0,16		0,02	nd	6,91	4,212	0,01	0,3	-
Manganês (Mn)	0,01	nd	0,033	nd	2,501	2,172	0,302	1,205	0,014	0,63	0,024	0,9962	0,039	0,0268	0,168		0,77		0,038	0,0194	1,19	0,904	0,005	0,4	-
Mercurio (Hg)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd		nd	nd	nd	nd	0,0002	0,001	0,001
Molibdênio (Mo)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		0,02		nd	nd	nd	nd	0,002	0,07	-
Níquel (Ni)	nd	nd	nd	nd	0,005	nd	0,007	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,004		nd		nd	nd	0,004	nd	0,005	0,02	-
Prata (Ag)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		0,001		nd	nd	nd	nd	0,005	0,05	-
Selênio (Se)	nd	nd	0,007	nd	0,016	nd	0,043	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		0,029		nd	nd	nd	nd	0,002	0,01	0,01
Vanádio (V)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd		nd	nd	nd	nd	0,002	-	-
Zinco (Zn)	0,008	0,0362	nd	0,0272	0,009	0,353	nd	0,023	nd	0,0445	nd	0,0434	nd	0,0308	nd		0,007		nd	0,0259	nd	0,0272	0,005	5	-

PM: poço de monitoramento; nd: não detectado; mg: miligrama; L: litro; (-): valor não referenciado.
 Negrito, concentração que ultrapassou os valores de intervenção de CETESB/05.

Figura 10 - Resultados analíticos de metais na água subterrânea (mg/L)
 Fonte: PMSC (2010)

toxicológicos à saúde humana. A avaliação de risco realizada foi calculada por meio das Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB vigentes em 2009 e do modelo de Avaliação de Risco Residencial Rural, por meio de dados obtidos em campo e dos resultados analíticos das amostras de águas superficiais e subterrâneas coletadas no entorno e na área-objeto de estudo. Estas planilhas estão disponíveis no site da CETESB² e foram desenvolvidas com base na metodologia da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), constituindo ferramentas auxiliares nos estudos de avaliação e gerenciamento de risco à saúde humana por exposição em áreas contaminadas. De acordo com a empresa Geoambiente, para efeito de cálculo da ARSH, foram considerados todos os compostos analisados nas águas que apresentaram concentrações acima dos limites de detecção do laboratório, considerando-se os receptores residenciais-rurais, isto é, as crianças e os adultos.

Para a caracterização dos riscos, foi elaborado um cenário representativo da área em estudo, o qual foi genericamente denominado pela empresa como “modelo conceitual da área”. Tal modelo contém elementos, tais como as fontes de contaminação, as vias de exposição, os receptores atuais ou potenciais e hipotéticos e os compostos químicos de interesse. Para o último elemento citado, foram considerados todos os compostos cujas análises químicas identificaram concentrações acima dos Valores de Intervenção da CETESB/2005, enquanto para a identificação das vias de exposição, considerou-se o “uso atual do terreno e de seu entorno”, o qual foi caracterizado por ser residencial e rural, considerando-se “um raio de 500 metros”.

A Figura 12, que pode ser visualizada a seguir, foi retirada do Relatório Final e apresenta o resumo do que foi definido na ARSH como fonte de contaminação, mecanismos de transporte, vias de exposição e receptores.

Já para os parâmetros de exposição, os quais contemplam o peso corpóreo, a frequência de exposição aos compostos carcinogênicos, a taxa de ingestão do solo/água subterrânea, a exposição dermal e outros dados relevantes para a ARSH, foram considerados os valores que constavam nas Planilhas de Avaliação de Risco da CETESB vigentes na época do estudo.

² Planilhas de Avaliação de risco. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2021/03/Contaminada-com-risco-confirmado.pdf>

Tabela 11.3.2.1 – Resumo das vias de exposição								
Fonte Contaminação	Mecanismo de Transporte		Via de Exposição	Receptor On site	Receptor Off site 1	Receptor Off site 2		
Água Subterrânea Afetada	Volatilização	Dispersão atmosférica /Acumulação de vapores em espaços fechados	Inalação de vapor e/ou partículas	Ambiente Aberto				
				NA	NA	NA		
				Ambiente Fechado				
				NA	NA	NA		
	Dinâmica hidrogeológica		Ingestão da água subterrânea	Res.		Água Sup.		
				(Crianças e Adultos)				
				Res.		Água Sup.		
				(Crianças e Adultos)				

NA: não aplicável.

Figura 12 - Tabela resumo das vias de exposição determinadas na ARSH

Fonte: PMSC (2011)

Para os parâmetros do meio físico, que caracterizam as condições do solo, do aquífero, do ar e dos ambientes confinados que influenciam na mobilidade e persistência dos compostos químicos de interesse nos diversos meios, foram considerados os dados de condutividade hidráulica e velocidade de fluxo provenientes do ensaio de permeabilidade *Slug Test*, bem como os parâmetros físicos e químicos relativos ao tipo de geologia local.

Em conformidade com a Decisão de Diretoria da CETESB vigente na época, foram utilizados os dados toxicológicos e físico-químicos dos compostos químicos de interesse disponibilizados pela CETESB, por meio das planilhas de avaliação de risco vigentes entre 2009 e 2011.

Como resultados da ARSH, para os compostos químicos de interesse considerados, não foram identificados quaisquer riscos carcinogênicos cumulativos para as vias de exposição consideradas. Contudo, foram identificados riscos cumulativos não carcinogênicos para a exposição à água subterrânea, ou seja, por meio de sua ingestão, para todos os receptores considerados – crianças e adultos – e para os seguintes compostos: chumbo, cobalto, ferro e manganês.

Por fim, foram determinadas as concentrações máximas aceitáveis que correspondem às máximas concentrações permitidas no solo e na água subterrânea da área-fonte de contaminação para que os receptores identificados não estejam expostos ao risco.

3.2.4. Medidas de Intervenção

O estudo também teve como objetivo a avaliação da necessidade de adoção de medidas de intervenção a serem implementadas na área para a posterior elaboração do Plano de Intervenção, ou seja, o Plano de Intervenção não foi elaborado no Relatório Final. Contudo, foram recomendadas algumas medidas de intervenção de controle institucional, as quais estão apresentadas a seguir e representadas na Figura 13:

- Realização do tamponamento do poço cacimba situado na região;
- Restrição ao uso da água superficial local;
- Restrição ao plantio de espécies vegetais para o consumo humano em toda a área do lixão e onde foi/for identificada contaminação;
- Impedimento da instalação de poços de captação de água subterrânea, considerando um perímetro de 500 metros a partir da área-objeto de estudo.

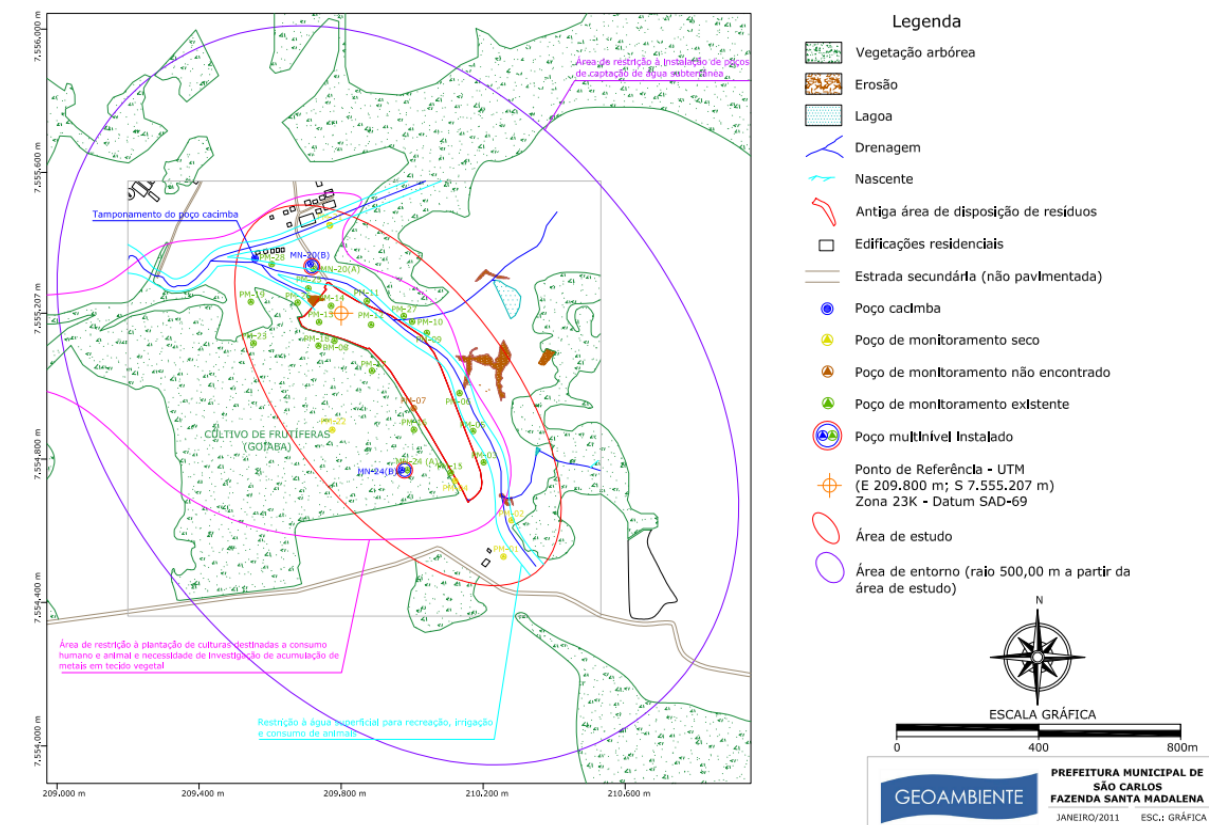


Figura 13 - Mapa de medidas de intervenção para a área

Fonte: PMSC (2010)

3.2.5. Recomendações

Por fim, o Relatório Final, que teve suas etapas resumidas brevemente nos subitens anteriores, apresentou recomendações para a área, em virtude dos resultados obtidos na ID e na ARSH, tais como a necessidade da continuidade dos trabalhos de diagnóstico ambiental na área, com o intuito de delimitar as áreas afetadas, bem como de definir os fatores que controlam a dispersão dos contaminantes presentes nas águas subterrâneas. O monitoramento das águas superficiais também foi recomendado pela empresa Geoambiente, bem como a realização de amostragens de sedimentos nas áreas onde for identificada contaminação da água superficial.

Além disso, foi recomendada a amostragem das goiabeiras que se situam sobre a área contaminada, a fim de avaliar o possível acúmulo de compostos contaminantes em suas estruturas, ou seja, nos tecidos vegetais das raízes, caules, folhas e frutos. A Geoambiente recomenda o corte da plantação e o encaminhamento para a incineração, caso sejam identificadas concentrações de metais nos tecidos das goiabeiras.

Por fim, a empresa executante do estudo recomendou a realização de uma nova ARSH, com o objetivo de determinar a verdadeira extensão das áreas de risco e das concentrações máximas a serem atingidas para a eliminação desse. Além disso, a empresa afirma que, se após uma nova ARSH, as concentrações dos compostos verificados continuarem a ultrapassar as concentrações máximas aceitáveis, alternativas tecnológicas de remediação deverão ser avaliadas e implementadas na área em estudo.

3.3. Estudos acadêmicos no Lixão Santa Madalena

De maneira complementar às investigações realizadas no contexto do Gerenciamento de Áreas Contaminadas, foram levantados diversos estudos de caráter ambiental, que tiveram como área objeto de estudo o antigo e desativado lixão Santa Madalena. As principais informações proporcionadas por tais trabalhos, bem como os principais resultados obtidos por eles estão apresentados resumidamente a seguir.

- **Mapeamento Geofísico do lixão de São Carlos (ELLERT et al., 1990)**

O artigo publicado na revista *Águas Subterrâneas*, em 1990, realizou o mapeamento do antigo lixão, por meio de métodos geofísicos de prospecção, com o principal objetivo de determinar a presença e extensão de qualquer nuvem poluente advinda da deposição de resíduos na antiga voçoroca. Os métodos utilizados foram: eletromagnético indutivo, eletrorresistividade e sísmica de refração, os quais foram usados para a determinação do comportamento horizontal e vertical do maciço geológico e das características hidrogeológicas.

O estudo foi realizado em um momento no qual a voçoroca ainda estava parcialmente visível e possuía extensão aproximada de 500m por 100m de largura, com profundidade variando entre 5 e 10m, estando preenchida em pelo menos $\frac{3}{4}$ de sua extensão. No que tange aos levantamentos geofísicos realizados por Ellert et al. (1990), foram utilizados os equipamentos EM 31 e EM 34, fabricados pela empresa Geonics, os quais foram aplicados nos perfis de caminhamento de condutividade do solo. Realizaram-se 13 perfis perpendiculares ao maior eixo da voçoroca, com distância de 10m entre os perfis.

Por meio dos dados obtidos, foram gerados gráficos 2D (condutividade x distância), 3D (condutividade x distância x distância) e curvas de iso-condutividade, os quais auxiliaram as conclusões obtidas pelos autores do artigo. Os gráficos gerados podem ser observados na Figura 14.

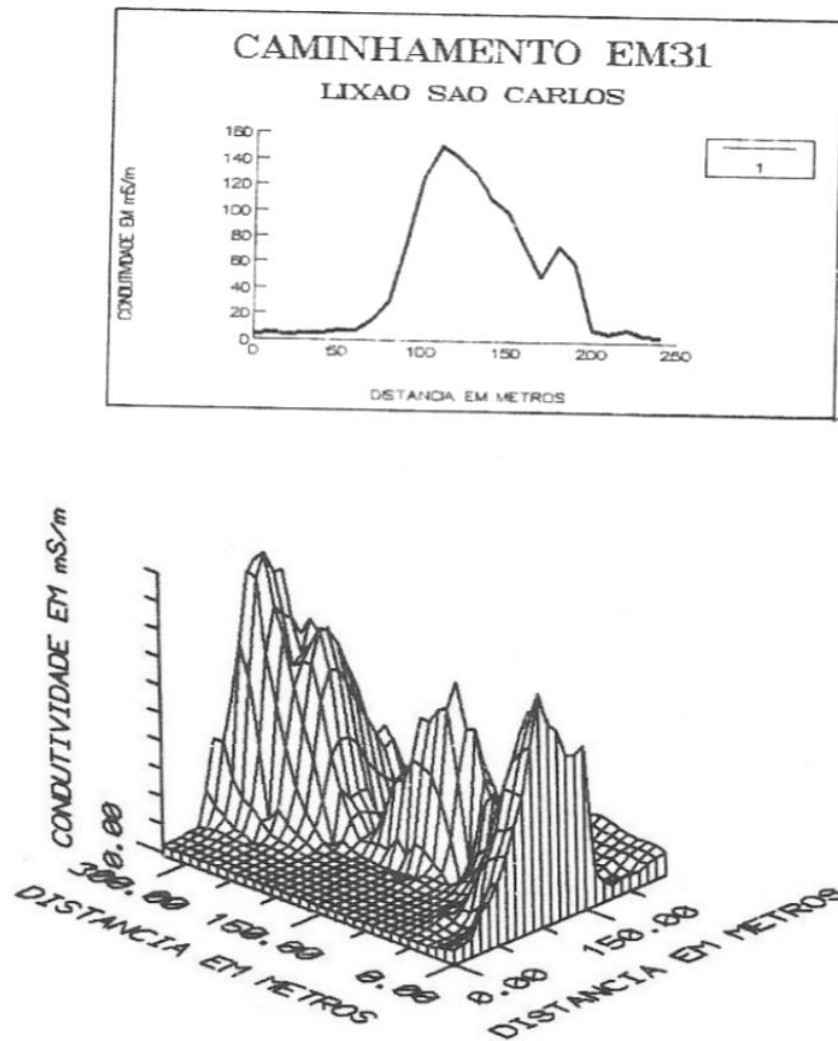


Figura 14 - Gráficos 2d e 3d da condutividade aparente com o aparelho EM31
 Fonte: Ellert et al. (1990)

De acordo com os autores, os métodos geofísicos são de grande aplicabilidade na identificação e na determinação da extensão de “*nuvens poluentes no subsolo*”, sendo que os dados obtidos indicaram a existência de uma tênue nuvem de poluente que ruma para a direção WSE. Ademais, por meio da sondagem elétrica vertical, comprovou-se a existência de camadas profundas com condutividade contrastante, confirmando a contaminação do meio físico local.

Por fim, os autores alertam sobre o elevado risco de contaminação gerado pela disposição inadequada de resíduos, principalmente em zonas de recarga de aquífero, como é o caso do lixão Santa Madalena, afirmando que tal prática representa um elevado custo quanto à qualidade das águas subterrâneas, uma vez que esse recurso é comprometido e requer muito tempo e grandes investimentos para ser recuperado.

- **Determinação da direção do fluxo de freático no aterro sanitário de São Carlos (GONÇALVES; BOSSOLAN e ORLANDO, 1992)**

O artigo publicado na Revista Águas Subterrâneas, em 1992, teve como objetivo a determinação do fluxo das águas subterrâneas, por meio da construção de piezômetros, nos quais foram medidos os níveis de água e, conseqüentemente, obtida a superfície piezométrica. Inicialmente, os autores realizaram a caracterização da região onde se insere o antigo lixão Santa Madalena, levantando características da geologia local, da geomorfologia, dos aspectos climáticos, entre outras.

No que tange os trabalhos realizados no estudo, foram constituídos 10 piezômetros, com diâmetro de 4", em obediência à norma CETESB 06-010 de 1988 - Construção de Poços de Monitoramento de Aquífero Freático. Além disso foi realizado o levantamento topográfico com o objetivo de localizar precisamente cada um dos piezômetros, nos quais foram determinados os níveis de água em relação ao nível do mar.

Como resultado, o estudo apontou a direção do fluxo das águas subterrâneas para noroeste e concluiu que tal fluxo, aliado à alta permeabilidade do substrato local, pode indicar que grande parte do chorume produzido pelo antigo depósito de resíduos se infiltra em direção ao aquífero profundo.

- **Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao 'lixão' da cidade de São Carlos (GADOTTI, 1997)**

A dissertação apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em 1997, avaliou a contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão Santa Madalena, por meio dos levantamentos planialtimétrico e geofísico, da determinação das principais direções de fluxo e da instalação de 15 poços de amostragem e monitoramento. Além disso, foi realizado o levantamento de uso e ocupação da área, bem como o estudo das características de operação do lixão. Em visita à área objeto de estudo, foi constatado que, dos 10 poços construídos por Gonçalves, Bossolan e Orlando (1992), apenas 3 não estavam encobertos por resíduos, isto é, os demais poços foram encobertos pelos materiais depositados, uma vez que o lixão ainda estava em operação.

No que tange à metodologia utilizada, foi realizada uma investigação horizontal e vertical, por meio de 6 caminhamentos elétricos com arranjo dipolo-dipolo, na área do depósito de resíduos, cuja profundidade de investigação atingida foi de 30 metros. Os novos poços de

monitoramento e amostragem foram construídos a partir dos resultados do ensaio geofísico, contudo, não há explicações aprofundadas relativas à escolha das localizações desses poços, os quais foram construídos com base na norma CETESB 06.101/1988, vigente na época.

O monitoramento das águas foi conduzido mensalmente e ocorreu entre os meses de fevereiro a julho, totalizando 6 campanhas de amostragem nos 15 poços construídos, contemplando a aferição das características físico-químicas das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao antigo lixão (Figura 15).

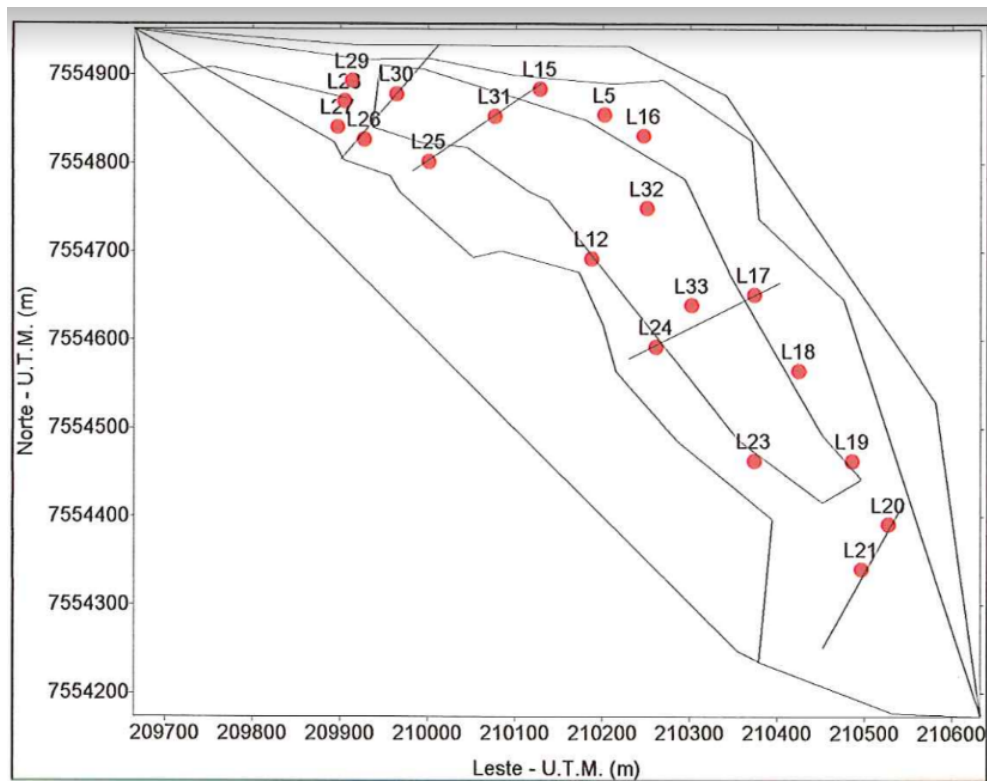


Figura 15 - Localização dos poços avaliados

Fonte: Gadotti (1997)

O estudo realizado por Gadotti (1997) revelou a existência de um escoamento das águas subterrâneas na direção sudoeste. No que tange à alteração da qualidade da água superficial, os elementos mais indicativos foram os cloretos e a condutividade elétrica. Nas águas subterrâneas, somente o bário, o nitrato e o cloreto tiveram suas concentrações superiores aos limites de potabilidade vigentes na época.

Além disso, Gadotti (1997) afirma que a formação geológica demonstrou alta capacidade de atenuação da poluição, uma vez que os valores encontrados se apresentaram abaixo dos valores que inicialmente eram esperados, considerando-se os resultados obtidos por Schalh (1992). Contudo, nas águas superficiais, observou-se alterações na sua qualidade, o

que demonstrou que o lixão é a principal fonte de poluição das águas do Córrego São José, localizado à jusante do antigo lixão. Cabe citar que o autor menciona que não foram detectadas concentrações de cromo, cobre, níquel, zinco, fósforo, boro, cádmio e chumbo, não especificando a matriz analisada.

- **Contribuição ao conhecimento do meio físico da região do lixão de São Carlos - SP, através de estudos geológicos, geofísicos, topográficos e químicos (ÁLVARES, 2000)**

A dissertação apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em 2000, buscou a obtenção de novas informações e interpretações da área objeto de investigação, por meio de estudos químicos e geofísicos, com a aplicação dos seguintes métodos: eletrorresistividade, SEV e perfilagem de poços. Para o método de eletrorresistividade, foram utilizados caminhamentos elétricos dipolo-dipolo, com profundidade de investigação até 30 metros, enquanto para a perfilagem de poços, foram aplicadas as ferramentas Gama Natural, a qual identifica a presença de camadas argilosas; Indução, a qual mede a condutividade e a resistividade real dos diversos estratos; e Temperatura, a qual mede temperatura do fluido interno ao poço.

Contudo, em decorrência da presença de metais na área estudada, a ferramenta de indução não proporcionou resultados, uma vez que, de acordo com Álvares (2000), “Sabidamente a ferramenta indução não funciona em poços com revestimento metálico e, igualmente, no caso de poço não revestido ou com revestimento plástico”, este último sendo encontrado nos poços do antigo lixão.

O trabalho contemplou uma ampla revisão bibliográfica sobre aspectos de interesse do estudo, tal como a qualidade de água - química e microbiológica - levantando as diferenças existentes entre as águas poluídas e não poluídas, além de aspectos dos estudos geofísicos e da realização de levantamento dos estudos ambientais realizados anteriormente na área estudada.

Com o intuito de aprofundar o conhecimento das condições do meio físico da área do antigo lixão, foram realizados o mapeamento geológico da área e o levantamento topográfico local, além da amostragem de água subterrânea, cujas amostras foram submetidas a análises químicas de interesse. As campanhas de amostragem foram realizadas nos meses de agosto e outubro de 1996 e janeiro de 1997 e as coletas de água subterrânea foram realizadas em poços de monitoramento previamente instalados, enquanto as coletas de águas superficiais foram realizadas em diferentes localizações à montante e à jusante do maciço de resíduos. Os pontos

de amostragem realizados estão apresentados na Figura 16, cujas coordenadas estão apresentadas na Figura 17.

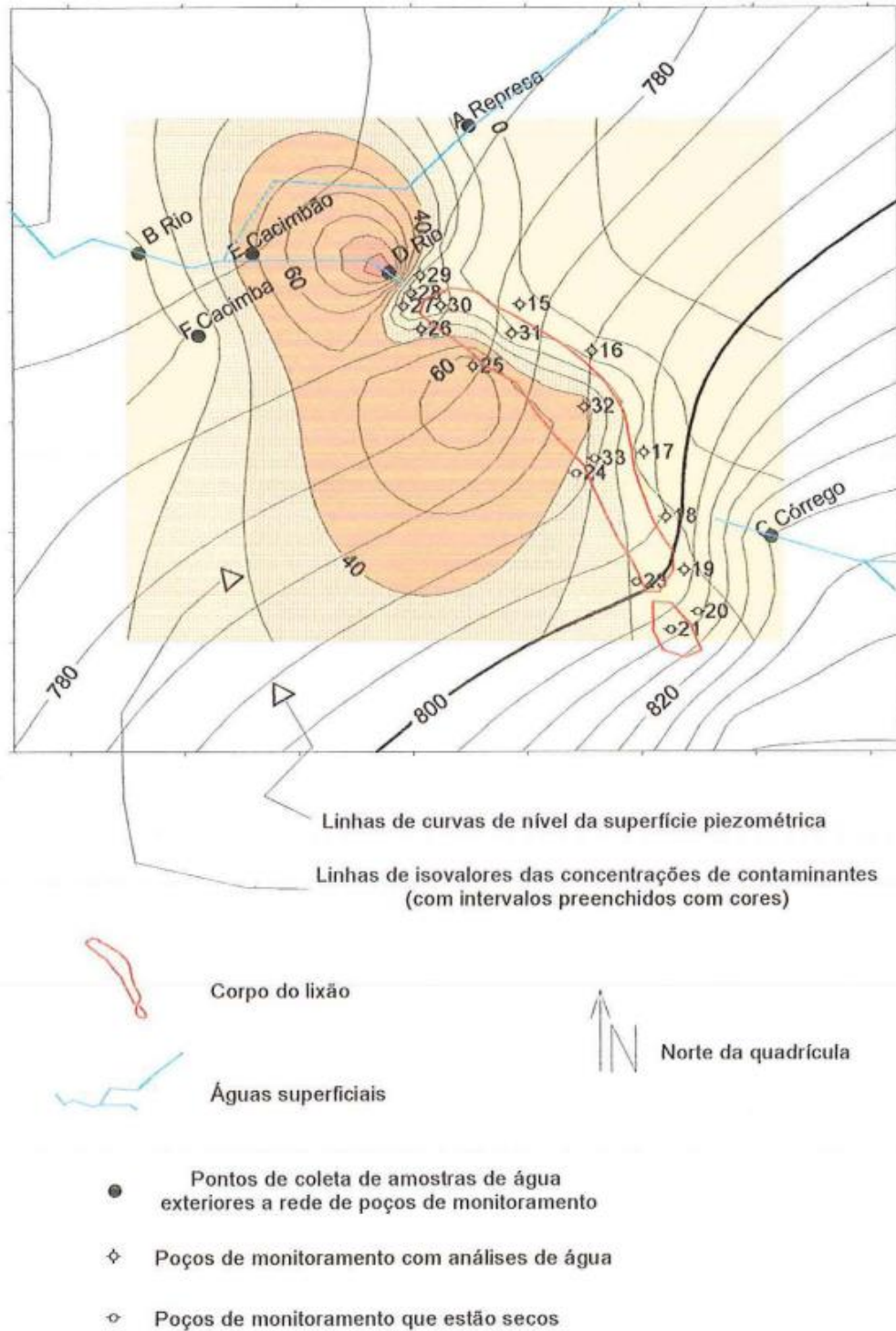


Figura 16 - Localização dos pontos de amostragem avaliados e representação gráfica das curvas de isovalores

Fonte: Álvares (2000)

Ponto (poços)	Coordenada N-S (m)	Coordenada E-W (m)	Cota (m)
15	7555212	209988	790.886
16	7555127	210113.7	796.428
17	7554943	210203.5	806.156
18	7554826	210242.2	812.866
19	7554730	210274.3	818.482
20	7554654	210297.6	827.769
21	7554621	210250.1	828.449
23	7554708	210190	819.82
24	7554905	210085.5	803.55
25	7555100	209905.3	786.001
26	7555167	209814.7	781.211
27	7555209	209783.9	777.287
28	7555232	209797.4	775.043
29	7555264	209813.8	777.125
30	7555210	209849.5	780.419
31	7555159	209973.3	788.62
32	7555026	210099.4	798.471
33	7554932	210117.4	804.575
Estação climatológica	7555176	209988.7	790.311
L51 (UFSCar)	7555160	210078.2	796.468
L52 (UFSCar)	7555156	210078.5	796.035

Figura 17 - Coordenadas UTM e cotas dos poços de monitoramento avaliados

Fonte: Álvares, 2000

As análises químicas das águas amostradas indicaram sua contaminação, especialmente nos locais de amostragem situados à jusante do antigo lixão. Os principais parâmetros que indicam contaminação da água superficial foram: alcalinidade, cloreto, condutividade e DQO; enquanto para as águas subterrâneas foram: alcalinidade, cloreto, condutividade, DQO, manganês e OD. O ferro e o fosfato, apesar de terem apresentado concentrações superiores aos limites de potabilidade da Portaria GM nº 36/1990, tanto para água subterrânea como para superficial, podem estar relacionados à condução inadequada da amostragem, bem como à natureza dos compartimentos ambientais da área ou, até mesmo, às outras atividades desenvolvidas localmente, tal como a agropecuária.

No que tange à resistividade aparente, os valores obtidos foram maiores nas camadas superficiais dos pontos investigativos localizados à montante e no interior do maciço, enquanto, nos pontos de investigação localizados à jusante, obteve-se menores valores de resistividade nas camadas mais superficiais. Tais constatações levaram o autor a concluir que a interação entre o meio físico, os resíduos depositados e os líquidos percolados são responsáveis pela baixa resistividade, a qual também apresenta menores valores com o aumento da profundidade.

Álvares (2000) discorda do estudo de Freitas (1996) quanto à granulometria da região, afirmando, com base nas perfilagens geofísicas realizadas, que os sedimentos encontrados nas proximidades do lixão, especificamente à jusante, são mais siltosos quando comparados com os sedimentos verificados à montante do maciço de resíduos.

Por fim, o estudo conclui que, devido à existência de acamamentos siltosos e/ou argilosos verificados na perfilagem, cujas espessuras variam de decímetros a metros, em conjunto com a existência de camada rochosa resistiva, o aquífero profundo pode ser protegido do risco de contaminação. Contudo, o autor afirma que tal cenário possibilita o escoamento dos contaminantes até as águas superficiais. Além disso, a contaminação do aquífero, até as profundidades atingidas pelos poços existentes e amostrados, foi novamente confirmada, de acordo com Álvares (2000).

- **Caracterização geológica-geofísica do lixão desativado de São Carlos, com auxílio da geofísica (VELOZO, 2006)**

A dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em 2006, teve como objetivo a caracterização geológica-geotécnica da área ocupada pelo antigo lixão de São Carlos, por meio da realização de estudos geofísicos. Para tal, foram utilizados métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida, a fim de determinar relações entre os componentes do aterro e do meio físico e de obter o sentido do fluxo subterrâneo.

Os ensaios geofísicos foram realizados com 6 linhas de caminhamentos elétricos dipolo-dipolo, conjuntamente com os de polarização induzida. Os caminhos percorridos foram dispostos perpendicularmente à área do maciço de resíduos, considerando a direção do fluxo subterrâneo semelhante à direção do fluxo superficial, realizando percursos semelhantes aos realizados em estudos anteriores para que fosse possível estabelecer uma comparação entre esses.

Além disso, foram realizados 5 ensaios de infiltração *in situ* (Figura 18), em conformidade com a norma ASTM-D 3385-88, visando a caracterização dos materiais inconsolidados, foi realizado o ensaio granulométrico, conforme a norma ABNT - NBR 7181/84, cujos resultados apontaram que os sedimentos presentes na área do antigo lixo são predominantemente arenosos finos a médio, com porções de argila compondo no máximo 34% da amostra (Figura 19).

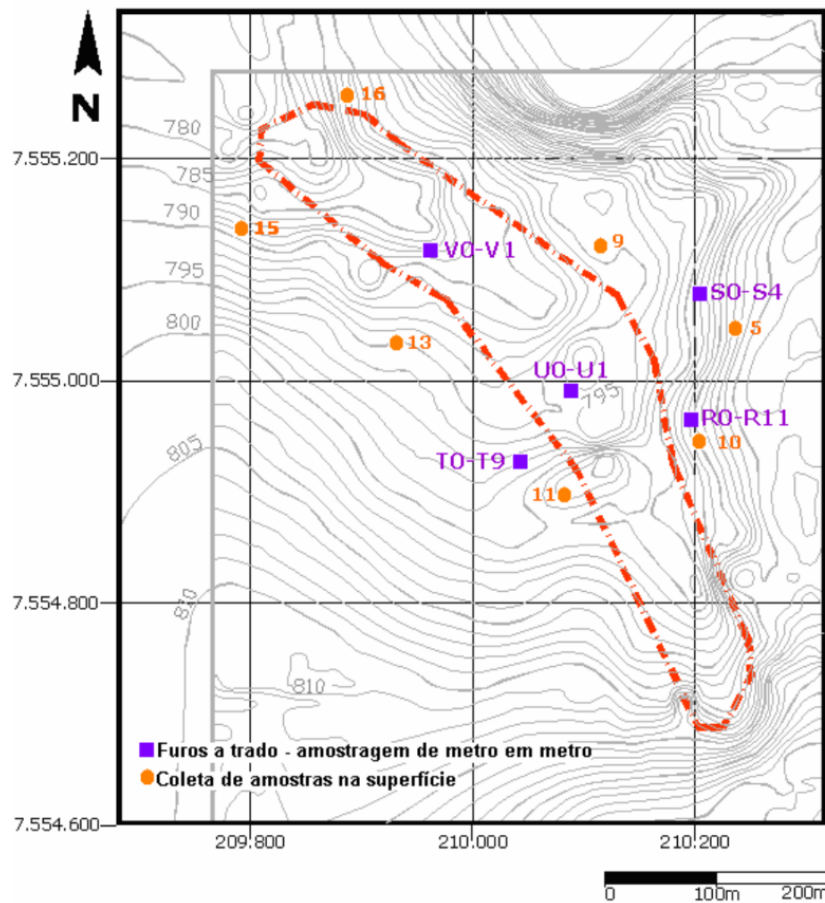


Figura 18 - Localização dos pontos de amostragem

Fonte: Velozo, 2006

Amostra	Argila %	Silte %	Areia Fina %	Areia Média %	Areia Gros. %	Amostra	Argila %	Silte %	Areia Fina %	Areia Média %	Areia Gros. %
5	6	2	50	42	0	S 0	7	3	41	49	0
9	21	13	33	31	2	S 1	10	3	40	47	0
10	19	7	36	37	1	S 2	10	28	45	17	0
11	4	5	52	38	1	S 3	7	3	41	49	0
13	7	4	42	46	1	S 4	10	4	42	42	2
15	12	24	41	22	1	T 0	6	7	47	40	0
16	10	5	46	38	1	T 1	13	4	43	40	0
R 0	20	9	35	35	1	T 2	10	5	43	42	0
R 1	29	8	33	30	0	T 3	14	6	46	33	1
R 2	28	9	33	30	0	T 4	17	8	37	34	4
R 3	28	9	32	31	0	T 5	15	5	43	36	1
R 4	24	6	35	35	0	T 6	12	5	43	39	1
R 5	18	5	38	38	1	T 7	10	5	47	38	0
R 6	8	4	40	48	0	T 8	10	13	50	27	0
R 7	9	4	39	46	2	T 9	8	8	50	34	0
R 8	10	7	39	42	2	U 0	24	12	34	29	1
R 9	9	3	33	55	0	U 1	29	10	33	26	2
R 10	34	8	31	27	0	V 0	11	5	44	38	2
R 11	16	6	40	38	0	V 1	11	5	38	40	6

Figura 19 - Granulometria dos pontos obtida

Fonte: Velozo, 2006

Também foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de determinação da massa específica dos sólidos, conforme a norma ABNT NBR 6508/84; ensaio de determinação da

massa específica aparente seca, conforme proposto por Zuquette (1987); o ensaio de adsorção de azul de metileno, foi realizado segundo os procedimentos apresentados por Pejon (1992), o qual constatou que as argilas existentes no local são inativas ou pouco ativas, possuindo baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e, portanto, baixa capacidade de retenção dos contaminantes (Figura 20); no que tange às suas propriedades hidráulicas, foi obtido o valor de 10^{-5} m/s para a condutividade hidráulica (K) (Figura 21).

Amostra	CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)	Vb	Acb	Amostra	CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)	Vb	Acb
5	1,209	9,440	0,386	7,015	S 0	0,749	5,852	0,239	3,680
9	2,452	19,145	0,783	3,762	S 1	1,040	8,117	0,332	3,351
10	1,857	14,502	0,593	3,187	S 2	0,922	7,198	0,294	3,065
11	0,469	3,661	0,150	4,156	S 3	0,800	6,244	0,255	3,545
13	1,007	7,866	0,322	4,798	S 4	1,471	11,488	0,470	4,388
15	0,694	5,420	0,222	1,816	T 0	0,609	4,757	0,194	3,136
16	3,089	24,116	0,986	9,759	T 1	1,091	8,522	0,348	2,700
R 0	2,260	17,645	0,721	3,606	T 2	0,915	7,144	0,292	2,808
R 1	4,311	33,666	1,376	4,811	T 3	1,240	9,678	0,396	2,786
R 2	3,534	27,597	1,128	4,000	T 4	2,492	19,457	0,795	4,820
R 3	3,903	30,476	1,246	4,433	T 5	2,311	18,047	0,738	4,918
R 4	3,485	27,213	1,112	4,693	T 6	1,739	13,576	0,555	4,784
R 5	1,819	14,204	0,581	3,207	T 7	1,583	12,357	0,505	4,904
R 6	0,886	6,915	0,283	3,671	T 8	1,618	12,632	0,516	4,964
R 7	1,481	11,567	0,473	5,029	T 9	1,187	9,272	0,379	4,986
R 8	2,403	18,764	0,767	7,374	U 0	3,673	28,679	1,172	4,824
R 9	1,046	8,168	0,334	3,882	U 1	4,588	35,822	1,464	4,980
R 10	4,568	35,669	1,458	4,339	V 0	1,620	12,648	0,517	4,743
R 11	2,652	20,704	0,846	5,356	V 1	1,711	13,358	0,546	4,875

Figura 20 - Capacidade de troca catiônica dos pontos

Fonte: Velozo, 2006

Ensaio	Prof. Máx. Tradagem (m)	Prof. frente Molhamento (m)	Taxa de infiltração estabilizada (mm/h)	Condutividade Hidráulica (m/s)
R	11	1,8	90	$2,37 * 10^{-5}$
S	3,8	1,0	240	$6,19 * 10^{-5}$
T	9,4	3,6	235	$6,25 * 10^{-5}$
U	0,2	0,2	50	$7,73 * 10^{-6}$
V	0,15	0,15	100	$1,33 * 10^{-5}$

Figura 21 - Condutividade hidráulica para cada ponto

Fonte: Velozo, 2006

Os resultados obtidos no referido estudo apontaram que a contaminação se estende até 25 metros de profundidade e que ocorre nas mesmas proporções da contaminação verificada em 1995. De acordo com Velozo (2006), tais resultados são semelhantes aos resultados proporcionados em outros estudos, indicando a contaminação da área e a possibilidade da existência de um aquífero suspenso, devido às camadas silto-argilosas identificadas.

A pluma de contaminação, por sua vez, apresentou um fluxo preferencial para nordeste, seguindo a mesma direção do fluxo do escoamento superficial. Por fim, a autora cita a

possibilidade de existir uma descontinuidade na região do maciço, fato que indica que o aquífero profundo pode ser vulnerável a possíveis contaminações. A Figura 22 representa o caminhamento físico quando percorrido sob os resíduos aterrados.

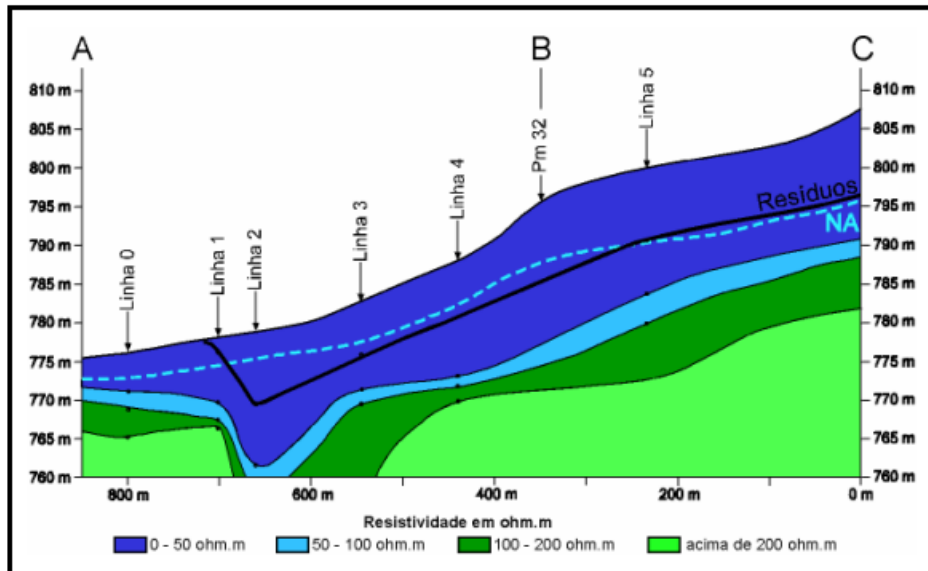


Figura 22 - Perfil geofísico que corta o corpo do lixo

Fonte: Velozo, 2006

A partir dos resultados obtidos, Velozo (2006) recomendou para os próximos estudos a utilização de tecnologias e metodologias que proporcionem um maior alcance em profundidade, a fim de constatar efetivamente a contaminação do aquífero profundo, além de estudos químicos e geoquímicos, com coletas de água superficial e subterrânea, visando a caracterização dos contaminantes presentes nas matrizes ambientais de interesse.

- **Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de lixão desativado (SHINZATO, 2014)**

Atese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em 2014, teve como principal objetivo avaliar a mobilização de poluentes no maciço de resíduos, bem como avaliar o potencial remanescente de contaminação proveniente do antigo lixão. A autora buscou revelar a qualidade do conteúdo aterrado, nas diferentes idades de deposição, classificar os resíduos, identificando o caráter inerte ou não inerte desses, além de verificar a qualidade do lixiviado não diluído que é gerado pela decomposição dos resíduos depositados. A autora também visou a determinação da fase de decomposição em que se encontrava o antigo lixão na época do estudo e a previsão dos possíveis ambientes geoquímicos nas águas subterrâneas, avaliando a possibilidade da interrupção do monitoramento no antigo lixão.

Para o alcance de tais objetivos, foi instalado um poço de 1,5m de diâmetro e 7m de profundidade, dentro do maciço de resíduos, com lisímetros de sucção acoplados em diferentes profundidades, para a análise do conteúdo aterrado e do lixiviado em camadas de resíduos com diferentes idades de deposição. Posteriormente, amostras de água subterrânea foram coletadas em poços de monitoramento situados à montante, internamente e à jusante do maciço, as quais foram submetidas às análises físico-químicas de interesse.

Sendo assim, foi realizada a escavação das camadas de resíduos, possibilitando a coleta individual de amostras sólidas e líquidas para a caracterização do maciço. Além disso, foram realizadas diversas análises da composição dos materiais obtidos, tais como análise granulométrica, em conformidade com a norma NBR 7.181/1984, análise de umidade, sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis, conforme diretrizes da norma NBR 10.664/1989, e, por fim, para a obtenção de extratos de solubilização, foi utilizada a norma NBR 10.006/2004.

A partir das atividades realizadas, obtiveram-se as características gerais do maciço de resíduo, por meio das quais foi elaborada uma figura representativa das camadas que compõem o perfil local em profundidade. Dessa forma, observaram-se duas camadas com espessura de 0,4m e maior teor de argila, sendo explicado por Menezes (1990), apud Shinzato (2014), que tais camadas são provenientes da cobertura dos resíduos com o solo do entorno do antigo lixão, cuja composição é predominantemente formada por argila orgânica de média a alta plasticidade.

Além disso, o estudo apontou que as camadas de solo e de resíduos verificadas no perfil se encontravam mal adensadas e sem padronização, fato que sugere a existência de maior quantidade de espaços vazios no maciço que pode contribuir para a entrada e o armazenamento de águas pluviais e, conseqüentemente, para a existência de lençóis suspensos de lixiviado.

Por meio de comparação entre estudos realizados na área em questão, entre 1989 e 2011 (GOMES, 1989; SCHALCH, 1992; MENEZES, 1995; FREITAS, 1996; GADOTTI, 1997; MATSUZAKI, 1998; ÁLVARES, 2000; PMSC, 2011) concluiu-se que a composição do material aterrado está sendo alterada, principalmente devido à sua decomposição e lixiviação, além de terem ocorrido variações na temperatura, a qual reduziu ao longo dos anos, servindo como um indicador de estágio avançado de decomposição.

A partir dos resultados obtidos no estudo, Shinzato (2014) concluiu que o antigo lixão se encontrava na fase metanogênica e que o chorume existente no maciço se encontrava imóvel, apresentando elevadas concentrações de contaminantes. Além disso, a autora afirma que os resíduos podem ser caracterizados como não inertes e que há a mobilização de Fe, Ca, Mg, K, Na, Ni, Zn, Pb e Cd do maciço para o lixiviado. Os principais parâmetros de interesse ambiental

identificados no lixiviado foram nitrogênio amoniacal, Cd, Cr, Pb, NO₃ e DBO, enquanto nas águas subterrâneas foram verificados elementos, tais como o nitrogênio amoniacal, Cr, Cd, Al, Ni, Fe, Mn e Pb.

Os resultados do ensaio de solubilização das amostras sólidas e os resultados de elevadas concentrações de poluentes no chorume imóvel demonstram que o conteúdo aterrado não pode ser considerado inerte, sendo necessária a continuidade do monitoramento na área. Além disso, os resíduos plásticos verificados no maciço possivelmente funcionam como uma camada impermeabilizante, evitando a infiltração de poluentes no aquífero profundo. No que tange ao lixiviado, as concentrações de nitrogênio amoniacal, Cd, Cr, Pb, NO₃⁻ e DBO apresentaram valores acima do permitido pelo decreto Estadual n° 8468, e, dessa forma, o lixiviado não poderia ser lançado no meio sem o devido tratamento.

Ademais, verificou-se que as concentrações de contaminantes apresentam menores valores quando as investigações se afastam do maciço, além de ter sido verificado que a razão DBO/DQO do lixiviado apresentou resultados superiores a 0,1, comprovando que tal efluente ainda não estava estabilizado na época do estudo. Ademais, Shinzato (2014) afirma que a metodologia utilizada no referido estudo pode ser aplicada em outros projetos de aterro/lixão, sendo sugeridas pelo menos 3 etapas de verificação, as quais correspondem a: 1) verificação dos resíduos aterrados, identificando seu caráter inerte ou não inerte; 2) verificação do lixiviado no que tange os padrões de lançamento de efluentes; 3) verificação das águas subterrâneas quanto ao atendimento dos padrões de potabilidade.

Por fim, a autora comprovou, por meio dos dados de qualidade do conteúdo aterrado e do lixiviado, que há uma significativa mobilização de poluentes dentro do maciço de resíduos, o qual, apesar de estar desativado há quase duas décadas, em relação à época do estudo, ainda pôde ser considerado como fonte primária de poluentes e que, dessa forma, o monitoramento da área não poderia ser descontinuado.

Foram recomendadas pesquisas, com foco na padronização de métodos de avaliação de lixões e na determinação de critérios que definam quando a área deixa de ser uma ameaça para a saúde humana e para o meio ambiente. Recomendou-se, também, o estudo de outros lixões/aterros controlados, para proporcionar maiores dados e informações para o banco de dados sobre a temática.

Para o lixão Santa Madalena, foi recomendado o monitoramento contínuo, com o uso de *divers* para a elaboração de um mapa potenciométrico representativo, além da instalação de uma estação meteorológica para a estimativa de um balanço hídrico no maciço e sua interação com a produção de lixiviado; coletas de águas subterrâneas com sistema *low-flow*, com a análise

de amostras brutas e filtradas; o estudo das variáveis de interesse, tanto no lixiviado quanto nas águas subterrâneas, tais como o potencial redox, cloretos, metano, gás sulfídrico, metais e oxigênio dissolvido. Por fim, foi recomendada a investigação da redução de pH nos poços à jusante e o estudo do comportamento do ferro dentro do maciço, no lixiviado e nas águas subterrâneas.

- **Qualidade da água e ictiofauna do córrego São José, São Carlos (SP): ênfase nos impactos gerados por lixão desativado (RESENDE et al., 2014)**

O artigo publicado na revista “Ciência e Natura”, em 2014, teve como objetivo estabelecer correlações entre as características limnológicas do sistema aquático e o uso e ocupação do solo local, por meio da análise da ictiofauna do Córrego São José, o qual está localizado próximo ao antigo lixão Santa Madalena. Para isso, foram realizadas quatro amostragens (Figura 23), em 2007, em cinco estações de coleta para a determinação da temperatura da água, do pH, do oxigênio dissolvido, da condutividade elétrica e de fósforo e nitrogênio totais e dissolvidos, além de ter sido realizada a identificação e classificação trófica da ictiofauna.

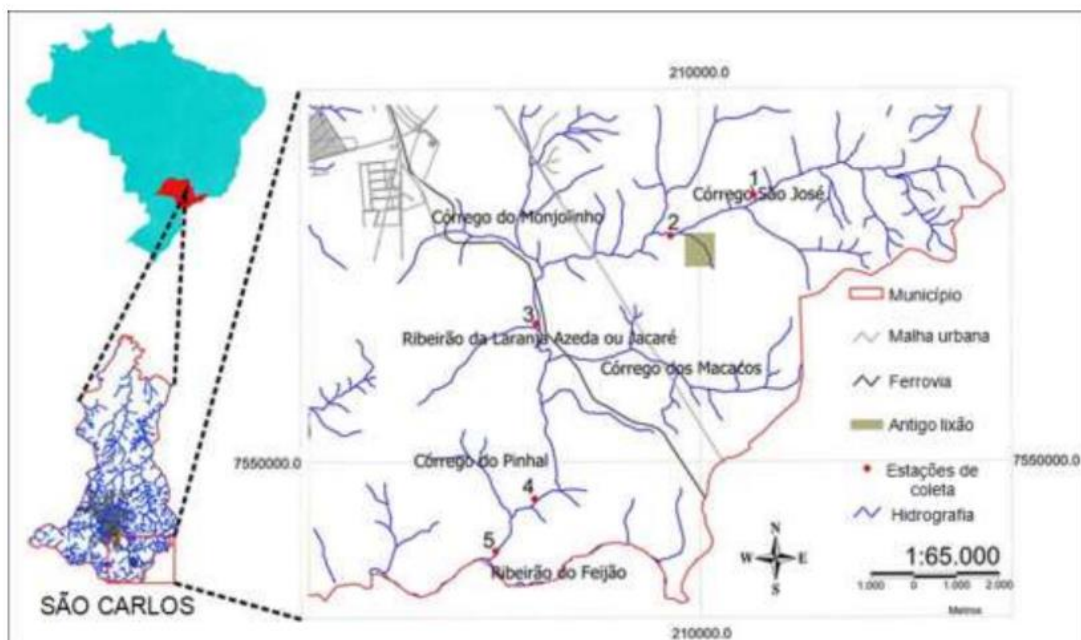


Figura 23 - Pontos de coleta de água superficial

Fonte: Resende et al. (2014)

Para a obtenção dos resultados, a fim de verificar a biodiversidade local, foram calculados diversos índices, por meio de equações, tais como o Índice de Diversidade de Shannon, o Índice Ponderal de Dominância e o Índice Alimentar de Kawaki e Vazzoller. Cabe

mencionar que a influência da sazonalidade foi considerada no estudo, a qual poderia interferir nos resultados das análises, contudo, tal influência não foi constatada.

Como principais resultados, foi verificado que as medições realizadas na estação localizada imediatamente à jusante do antigo lixão apresentaram os maiores valores de condutividade elétrica, além das maiores concentrações médias de nutrientes e menores concentrações de oxigênio dissolvido. Além do mais, na mesma estação, houve a predominância de espécies de peixes tolerantes à poluição.

Sendo assim, o estudo sugeriu que, mesmo após mais de uma década da desativação do antigo lixão, os resíduos ali depositados ainda representavam uma fonte de contaminação para o Córrego São José. Contudo, cabe mencionar que o estudo em questão realizou as referidas coletas em 2007, isto é, 7 anos antes da publicação do artigo, e que os resultados obtidos possivelmente não correspondem à realidade da ictiofauna existente no ano 2014.

- **Caracterização dos resíduos sólidos e do lixiviado produzido por antigo depósito de resíduos (MORITA & WENDLAND, 2019a)**

O artigo apresentado no “Simpósio sobre Resíduos Sólidos”, em 2019, visou contribuir com o entendimento do comportamento dos resíduos sólidos aterrados a longo prazo, utilizando como objeto de estudo o antigo lixão Santa Madalena, o qual teve seu encerramento 25 anos antes da publicação do referido artigo.

Para a avaliação físico-química dos resíduos aterrados, foram coletadas doze amostras sólidas, por meio de trado manual, em quatro pontos espaçados em cerca de 15 metros. As amostras, coletadas em dezembro de 2017, contemplaram três diferentes profundidades (30 cm, 1m e 2m) em cada um dos quatro pontos de investigação e foram submetidas a ensaios de solubilização, em conformidade com a norma NBR 10.006/2004 (ABNT, 2004). A partir do referido ensaio, as amostras foram filtradas e os parâmetros de interesse do estudo foram analisados, tais como a alcalinidade, a série nitrogenada, o cloreto, a demanda química de oxigênio (DQO), os metais, entre outros.

Para a amostragem do lixiviado, foram utilizados os lisímetros previamente instalados em diferentes profundidades na estação de monitoramento situada no depósito de resíduos de maneira similar à adotada por Shinzato (2014). As amostras foram coletadas em julho e dezembro de 2017 com o intuito de avaliar a influência da sazonalidade no lixiviado.

O estudo obteve resultados que mostraram que os resíduos não podem ser considerados inertes em termos de Pb, Mn, Fe, Cd e Al, para os quais foram obtidos valores de concentração superiores aos valores orientadores da norma ABNT 10.006/2004 (ABNT, 2004).

No que tange aos resultados das análises de lixiviado, os quais consideraram as mudanças sazonais e espaciais (em profundidade), observou-se que as maiores concentrações dos poluentes analisados ocorreram na profundidade de 2,85m, indicando um possível acúmulo deste líquido nesta profundidade, o qual possivelmente está associado à existência de materiais plásticos não degradados no depósito.

Além disso, foi verificada maior concentração de contaminantes na estação seca em detrimento da estação chuvosa, na qual ocorre maior diluição dos poluentes, com exceção do nitrogênio amoniacal. Os autores explicam que a infiltração de água pluvial no maciço de resíduos acarreta a diluição dos poluentes e o possível carreamento para as camadas mais profundas. Já em relação ao nitrogênio amoniacal, os autores sugerem que a entrada de água pluvial na estação chuvosa possibilita a ocorrência de reações que levam à sua liberação, supondo que o aumento da umidade no meio acelera as reações de degradação microbiana da matéria orgânica.

Por fim, verificou-se que, em comparação com estudos elaborados por Shinzato (2014) e Schalch (1992) na mesma área de estudo (Figura 24), os valores encontrados para a condutividade elétrica, a DQO e a alcalinidade reduziram em até 90%. Contudo, os resultados obtidos no artigo em questão revelaram que “as concentrações remanescentes ainda são consideravelmente altas” (MORITA & WENDLAND, 2019a), oferecendo risco à saúde pública e ao meio ambiente.

Parâmetro	Schalch (1992)	Shinzato (2014)	Faixa deste estudo (2017)
pH	5,3 - 7,8	6 - 8	7 - 9
Condutividade (µS/cm)	24000 - 43000	1000 - 8000	2000 - 8000
DQO (mg/L)	1980 - 61750	150 - 1000	50 - 600
Alcalinidade (mg/L)	7700 - 15680	1000 - 5000	500 - 3000

Figura 24 - Comparação da qualidade do lixiviado obtida por diferentes estudos

Fonte: Morita& Wendland (2019a)

- **Caracterização Hidrogeoquímica de área impactada por depósito de resíduos desativado em zona de recarga do aquífero Guarani (MORITA & WENDLAND, 2019b)**

O artigo publicado na revista “Geociências”, em 2019, estudou os contaminantes encontrados no entorno do antigo depósito de resíduos - lixão Santa Madalena - considerando as variações sazonais que podem influenciar na concentração de contaminantes.

Inicialmente, foi realizada a caracterização da área objeto de estudo, para a melhor compreensão das características que regem os processos que ocorrem localmente. Posteriormente, foram apresentados os resultados obtidos, por meio das amostras de água subterrânea coletadas em 12 poços de monitoramento e de água superficial em 2 pontos a jusante (Figura 25), nos meses de julho e dezembro de 2017, em conformidade com o manual *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. As amostras coletadas foram submetidas às análises dos parâmetros de interesse do estudo, tais como o pH, a condutividade elétrica, a alcalinidade e DQO, além de cloretos, nitrato, nitrogênio amoniacal, ferro, manganês, cálcio e metais potencialmente tóxicos, sendo apresentado na Figura 26 os valores obtidos para água subterrânea.



Figura 25 - Localização dos poços de monitoramento e pontos de amostragem
Fonte: Morita & Wendland (2019b)

PARÂMETRO	P 7	P 9	P 10	P 12	P 13	P 17	P 2	P 3	P 14	P 15	P 18	P 23	VT*	PP**
Temperatura (°C)	17,37	16,44	17,54	18,24	18,36	17,66			17,33	17,21	16,57			
Eh (mV)	231,0	242,1	243,8	-51,4	254,0	274,1	212,2	175,7	3,9	128,1	184,2			
pH	5,2	4,8	4,8	6,3	5,1	5,2	5,3	6,4	7,0	6,2	5,3	5,5		
Condutividade (µS/cm)	79,1	49,2	34,6	543,0	26,0	34,9	18,7	56,4	1026,0	120,5	414,0	40,6		
N.A.(m)	7,14	15,10	13,15	19,97	14,26	8,92	27,64	28,61	2,85	5,77				
Alcalinidade (mg/L)	3,2	0,0	0,0	244,0	7,0	8,8	31,2	46,8	66,5	8,1	19,6	11,9		
N-NO ₃ (mg/L)	0,010	0,020	0,020	0,005	0,005	0,007	0,008	0,005	0,026	0,002	2,010	0,004		1,000
N-NO ₂ (mg/L)	4,50	3,28	1,79	1,24	1,11	0,95	5,59	1,48	3,14	0,38	0,01	0,71	10,00	10,00
N-NH ₄ (mg/L)	0,06	0,06	0,02	0,58	0,01	0,09	1,96	0,08	46,25	1,67	2,55	0,11		1,5
Cl (mg/L)	6,4	3,4	2,4	9,2	1,0	2,4	2,1	ND	27,0	2,6	105,0	1,1		250
DOO(mg/L)	13	14	15	23	13	15	35	16	62	14	6	19		
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0,04	0,01	0,01	0,07	0,06	0,49	0,01	0,17	0,07	0,20	0,03	0,06		
Pb (mg/L)	<branco	<branco	<branco	<branco	<branco	<branco	0,02	0,01	<branco	0,04	<branco	<branco	0,01	0,01
Mn(mg/L)	0,025	<branco	<branco	1,302	<branco	<branco	0,385	<branco	0,986	0,237	0,368	<branco		0,1
Fe(mg/L)	<branco	0,091	0,194	8,492	0,210	0,473	0,006	<branco	0,032	10,872	23,340	0,499		0,300
Cd (mg/L)	<branco	<branco	0,020	<branco	0,016	<branco	<branco	<branco	<branco	<branco	0,015	0,015	0,005	0,005
Ca(mg/L)	1,377	2,017	1,847	36,987	1,769	2,177	2,307	4,567	74,887	122,487	7,149	1,869		

Figura 26 - Parâmetros físico-químicos da água subterrânea

Fonte: Morita & Wendland (2019b)

Para a comparação dos valores obtidos nas análises físico-químicas, foram utilizados os valores de intervenção da Decisão de Diretoria nº256/2016 da CETESB, bem como os padrões de potabilidade da Portaria nº2914/2011. Sendo assim, verificou-se que as concentrações acima dos valores orientadores ocorreram principalmente para os metais, especialmente para o chumbo, manganês, ferro e cádmio, sendo apresentado que o Pb e o Cd possivelmente estão associados aos resíduos industriais e de demolição que foram depositados no maciço de resíduos. Além disso, as elevadas concentrações de Fe e Mn foram associadas à ocorrência das reações redox no meio, estando relacionadas com a degradação da matéria orgânica existente na pluma de contaminantes.

Sob o ponto de vista geoquímico, os autores ressaltam que as altas concentrações de cálcio detectadas demonstram que pode haver dissolução mineral ou troca catiônica em decorrência do contato do lixiviado com a formação geológica local, existindo também a possibilidade de contribuição antrópica por meio da disposição de resíduos de construção e de demolição.

O estudo também apontou que as amostras coletadas nos poços localizados no interior do maciço apresentaram maiores concentrações de contaminantes, destacando-se os elevados valores de condutividade elétrica, alcalinidade, nitrogênio amoniacal, cloretos, ferro e manganês. Os autores afirmam que as anomalias encontradas condizem com os parâmetros

característicos de lixiviados e de áreas impactadas por esses. Já os resultados obtidos nos poços localizados à jusante do maciço de resíduos revelaram a influência deste, devido à detecção de diferentes contaminantes nesses poços, ainda que tenham apresentado menores concentrações em relação às concentrações encontradas no interior do depósito.

Os autores do artigo apontam que outros pesquisadores, tais como Elis & Zuquette (2012), também encontraram baixas concentrações de contaminantes no entorno de um depósito de resíduos localizado em Ribeirão Preto - SP. Além disso, de maneira similar, outros estudos citados por Christensen *et al.* (2000) mostraram que as plumas de contaminantes não costumam exceder 1 km de extensão, enquanto outros trabalhos demonstraram que plumas oriundas de depósitos de resíduos podem atingir distâncias maiores que 5 km, de acordo com Chakraborty *et al.* (2016) e Rana *et al.* (2017).

O artigo em questão apontou ainda que há indícios de atenuação dos contaminantes pela formação geológica, apesar de sua baixa capacidade teórica, uma vez que a formação possui óxidos e hidróxidos que aumentam significativamente a sorção de contaminantes. Contudo, os autores revelam que, ainda que haja redução das concentrações, não é possível afirmar que o depósito está controlado e estabilizado, uma vez que foram verificadas alterações na qualidade da água amostrada decorrentes da lixiviação dos compostos presentes no depósito de resíduos, especialmente após períodos chuvosos.

Por fim, Morita & Wendland (2019b) apontam a necessidade de atenção aos resultados obtidos, uma vez que “existe a possibilidade de outros compostos normalmente não amostrados em campanhas de monitoramento - como os contaminantes emergentes, amplamente encontrados em aterros - estarem sendo carreados para o entorno, proporcionando riscos à saúde pública e aos ecossistemas”.

- **Efeitos da impermeabilização superficial na mobilização de contaminantes na comunidade microbiana em depósito de resíduos sólidos urbano desativado (MORITA, 2020)**

A tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em 2020, teve como principais objetivos avaliar a função da impermeabilização superficial na mitigação dos impactos gerados por depósito de resíduos sólidos urbanos e analisar a atenuação natural dos mesmos na zona de recarga do aquífero Guarani. A autora também avaliou as variações da qualidade de água superficial e subterrânea, à montante e à jusante do depósito de resíduos, sendo realizada a caracterização da comunidade microbiana no depósito. Foi visada também a

delimitação da pluma de contaminantes, com auxílio de métodos geofísicos, assim como a análise da influência da impermeabilização superficial no lixiviado e na comunidade microbiana.

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho se dividiu em duas etapas: diagnóstico da área do estudo e a avaliação dos efeitos da impermeabilização superficial. No que se refere ao diagnóstico, foram feitos ensaios geofísicos ao longo do depósito, além de ocorrer a caracterização da água subterrânea, superficial e lixiviado, quanto aos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e ecotoxicológicos, enquanto que, para o resíduo aterrado, foram feitas análises físico-químicas e microbiológicas. Para um melhor entendimento sobre os processos que ocorrem na área, modelos conceituais foram elaborados para o diagnóstico.

O ensaio geofísico utilizou o método do caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, seguindo o mesmo caminho de trabalhos anteriores (GADOTTI, 1997 e VELOZO, 2006), porém atingindo uma profundidade de 80m. A coleta de água para o monitoramento da água superficial foi realizada em 5 pontos (1 à montante e 4 à jusante), enquanto para a água subterrânea foi realizada em 18 poços existentes, ocorrendo a comparação dos valores obtidos para metais potencialmente tóxicos com o valor de referência de qualidade (VRQ), valor de prevenção (VP) e valor de investigação ou intervenção (VI). Os pontos de coleta e suas coordenadas são apresentados nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

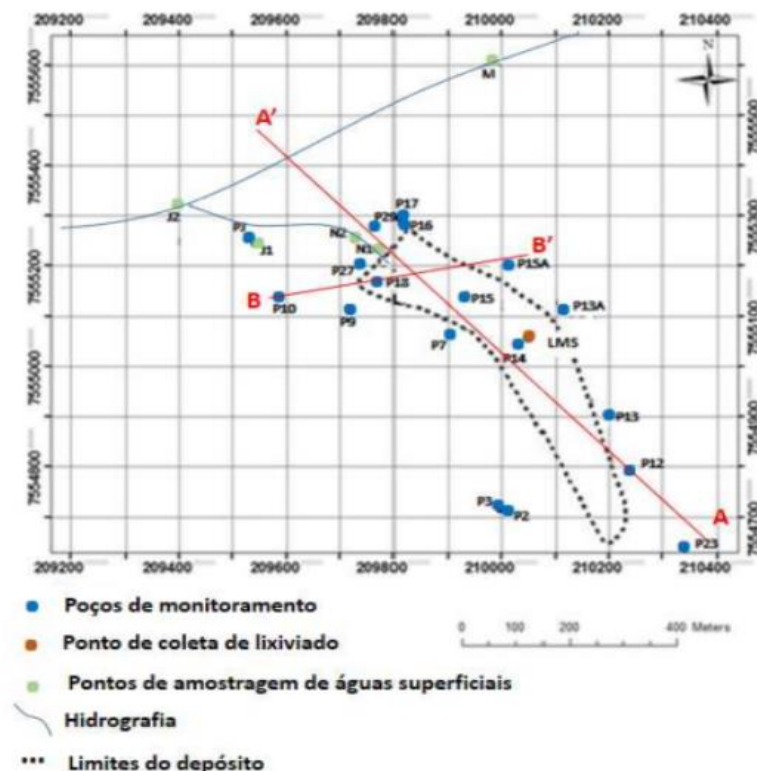


Figura 27 - Pontos de coleta e cortes utilizados para o modelo conceitual

Fonte: Morita (2020)

Poço	Coordenada X	Coordenada Y	Cota terreno (m)	Profundidade poço (m)	Profundidade filtro (m)	Material geológico
P2	210073	7554702	808,1	30	27-30	Solo arenoso
P3	210069	7554700	808,1	64	62-64	Solo arenoso
P7	209881	7555090	779,7	12	8-12	Solo arenoso
P9	209708	7555113	-	15	11-15	Solo arenoso
P10	209633	7555144	777,1	20	16-20	Solo arenoso
P12	210215	7554816	806,0	23,45	19,45-23,45	Solo arenoso
P13	210177	7554932	800,0	20,2	16,2-20,2	Solo arenoso
P13A	210114	7555127	790,4	9,7	5,7-9,7	Solo arenoso
P14	210038	7555061	789,1	20	15-20	Resíduos até 10m e solo arenoso
P15	209945	7555150		14	10-14	Resíduos até 11m e solo arenoso
P16	209814	7555272	776,4	12	8-12	Solo arenoso
P17	209814	7555275	775,5	37	35-37	Solo arenoso
P18	209786	7555159	775,0	10,9	6,9-10,9	Solo arenoso
P23	210272	7554647	821,4	19,4	17,4-19,4	Solo arenoso
LMS	210042	7555064	766,0	7	-	Resíduos
M	209951	7555635	798,6	-	-	-
J1	209491	7555244	772,8	-	-	-
J2	209363	7555277	754,6	-	-	-

Figura 28 - Coordenadas e características dos poços amostrados por Morita (2020)

Fonte: Morita (2020)

As análises microbiológicas e de ecotoxicidade foram feitas para se observar o efeito da poluição gerada nas comunidades biológicas locais, sendo realizada a análise do PCR-DGGE para verificar a riqueza e diversidade microbiológica local e a utilização das águas dos poços na ecotoxicidade, ambos ensaios realizados nos laboratórios da USP. No que se refere à análise do lixiviado, foram utilizados métodos similares ao de Shinzato (2014), ocorrendo a aferição de parâmetros de interesse *in situ*.

Através dos ensaios geofísicos, pode-se confirmar que a movimentação da pluma de contaminantes que alcança cerca de 40 a 50m de profundidade e 200m de extensão, quando comparado aos resultados obtidos por Gadotti (1997) - Figura 29. A contaminação pode estar ocorrendo em maiores profundidades em decorrência dos resultados obtidos, porém, por conta da não existência de poços de monitoramento no local, não foi possível confirmar os resultados obtidos pela geofísica (Figura 30). O estudo afirma que a extensão da pluma, considerando as águas superficiais, não atinge a distância de 500m à jusante do depósito, sendo necessário confirmar os dados para os dias atuais.

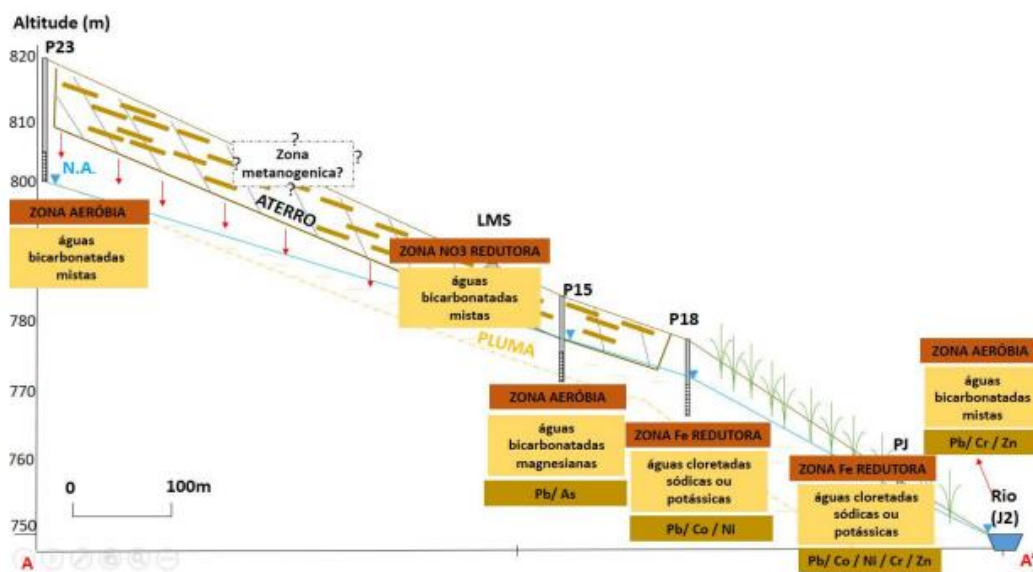


Figura 29 - Modelo conceitual da área de estudo

Fonte: Morita (2020)

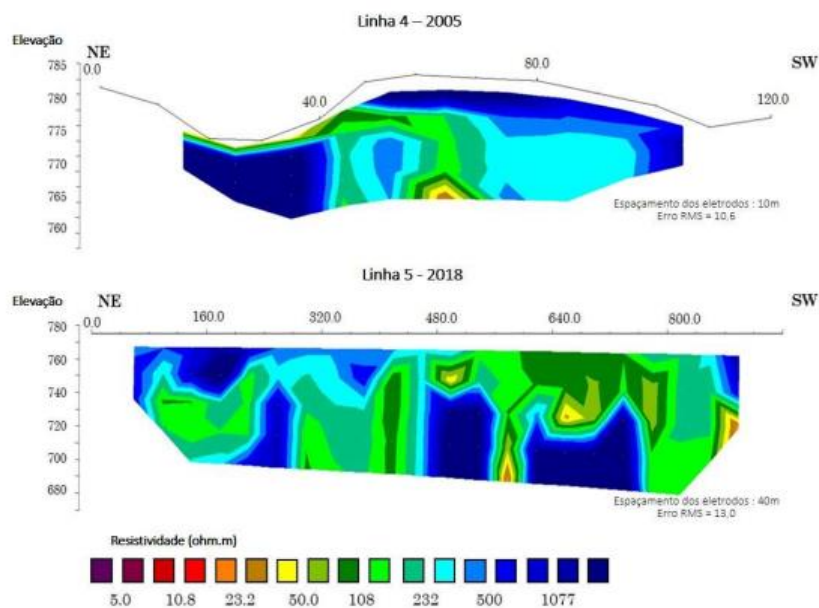


Figura 30 - Perfil de resistividade indicando possível contaminação

Fonte: Morita (2020)

Os parâmetros químicos selecionados como indicadores de poluição, seja para águas superficiais ou subterrâneas, foram: Condutividade Elétrica, Potencial de Oxirredução, alcalinidade, Cl, Na, K, Ca, Fe, Mn, N-NH₄ e N-NH₃. Para cada componente, foi realizado um boxplot, detalhando o valor encontrado para cada poço, assim como também é apresentado o mapa de distribuição dos indicadores de poluição. No que tange à análise de metais potencialmente tóxicos, foram analisados Pb, Co, As, Cr, Ni e Zn, com todos possuindo, em pelo menos um dos poços, valores superiores ao valor de intervenção, conseqüentemente podendo levar risco à saúde de quem entrar em contato com a água da região.

A localização dos poços não permite uma delimitação exata das zonas redox e da mobilidade de contaminantes específicos por conta de os poços representarem regiões distintas da pluma, com cada uma sofrendo uma influência singular de diluição. Também não foi observada uma atenuação natural dos componentes, mas sim uma possível variação da direção da pluma, fazendo com que alguns pontos possuam um valor inferior, quando comparado a estudos realizados anteriormente, como Gadotti (1997) e Velozo (2006).

Os testes ecotoxicológicos indicaram que a água superficial é tóxica para os organismos utilizados, com a distância do maciço de resíduos não influenciando na toxicidade dos contaminantes, mesmo a 500m do depósito a mortalidade de *Chironomus sancticaroli* foi de 40%; para o ensaio com o lixiviado, obteve-se mortalidade de 100% para os organismos avaliados, evidenciando a alta toxicidade.

A caracterização do maciço de resíduo apresentou que, segundo a norma NBR 10.006, os resíduos aterrados ainda não podem ser considerados inertes. Em relação à caracterização biológica, pode ser observado que o tipo de resíduo presente no local influencia na diversidade microbiana e fatores como temperatura e umidade influenciam no número de indivíduos. Porém, os resultados demonstram que diferentes padrões podem ser observados em depósitos de resíduos, dependendo das condições ambientais locais.

No que se refere à produção de lixiviado, verifica-se seu acúmulo à 2,85 m de profundidade, podendo ser explicado por resíduos plásticos (SHINZATO, 2014) ou por coberturas de camada de solo. Como as coletas foram feitas em períodos secos e chuvosos, o efeito da diluição é percebido em períodos de chuva. Apesar de suas características terem sido atenuadas com o tempo, quando comparado ao estudo de Schalch (1992), o lixiviado ainda se demonstra como uma ameaça de contaminação ao entorno, podendo ocorrer a liberação do chorume no meio, através de alterações climáticas ou a degradação dos resíduos que estão exercendo a função de barreiras impermeabilizantes.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir o objetivo proposto, o trabalho foi dividido em 3 etapas, sendo que a primeira etapa contemplou a revisão bibliográfica de estudos acadêmicos relativos ao antigo lixão Santa Madalena, com enfoque na caracterização do meio físico local e da contaminação local. Para tal, inicialmente foi realizado o levantamento dos referidos estudos acadêmicos, por meio da consulta aos *sites* “*google scholar*” e “*teses USP*” e da utilização dos termos “lixão Santa Madalena” e “depósito de resíduos de São Carlos” para a busca de resultados nos supracitados *sites*. Foram separados também os estudos utilizados na investigação detalhada, assim como os apontados na tese de Morita (2020). Sendo assim, foram levantados 16 estudos científicos a respeito do antigo lixão Santa Madalena, contudo, 6 estudos não estão disponíveis em formato digital e, portanto, não foram avaliados. Dessa forma, foram analisados 10 estudos acadêmicos: 2 teses, 3 dissertações e 5 artigos.

Além disso, foram levantadas as principais informações do relatório final da Investigação Ambiental Detalhada e da Análise de Risco à Saúde Humana, elaborado pela empresa Geoambiente, em 2011, além de ter sido realizada a leitura da Decisão de Diretoria 038/2017/C (CETESB, 2017) e do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (2021), no que tange à ID e à ARSH.

Sendo assim, a segunda etapa consistiu na comparação do conteúdo do relatório de investigação detalhada e da análise de risco à saúde humana, com as diretrizes estabelecidas na DD038, assim como foi realizado com os estudos acadêmicos, a fim de obter informações que possam auxiliar os futuros estudos ambientais na área e a elaboração do modelo conceitual no contexto do GAC.

Por fim, a terceira etapa consistiu na elaboração de sugestões, a partir das informações analisadas nas etapas anteriores, a fim de pontuar as ações e investigações que podem ser realizadas para o completo atendimento às exigências da CETESB (2017), no âmbito da ID e da ARSH, com vistas à continuidade do GAC na área objeto de estudo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme abordado anteriormente no presente trabalho, os estudos ambientais relativos aos lixões e às suas consequências para o meio ambiente ainda são escassos e muitas vezes não abordam com profundidade os processos e impactos que esses dispositivos inadequados acarretam para a qualidade ambiental. Tampouco esclarecem a aplicabilidade do processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas em áreas com alta complexidade, como é o caso dos lixões e dos aterros controlados.

Visando contribuir com o avanço das discussões relativas aos lixões e o GAC, e tomando como objeto de estudo o antigo Lixão Santa Madalena, o presente trabalho de graduação buscou analisar criticamente os estudos que foram desenvolvidos no referido lixão, bem como buscou avaliar a aplicabilidade dos resultados desses estudos na continuidade do GAC da área-objeto de estudo. Para isso, foram considerados 10 estudos ambientais, dentre eles 5 artigos, 3 dissertações e 2 teses, e os estudos de Investigação Ambiental Detalhada e Avaliação de Risco à Saúde Humana, os quais estão inseridos no processo de Gerenciamento de Áreas Contaminadas do antigo lixão e foram conduzidos em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela CETESB vigentes na época em que foram elaborados, isto é, de acordo com a Decisão de Diretoria nº103/2007/C/E e com o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas do ano 2001.

A seguir estão apresentados os resultados obtidos por meio do levantamento de informações realizado no presente estudo, os quais foram analisados considerando as limitações dos estudos levantados, tal como a época de elaboração desses. Ademais, foram levantadas as possibilidades de melhoria e a aplicabilidade de tais estudos no Gerenciamento de Áreas Contaminadas, considerando-se as exigências fundamentais para o aprimoramento do Modelo Conceitual da Área.

5.1. Análise da Investigação Ambiental Detalhada

5.1.1. Caracterização do meio físico

Conforme mencionado anteriormente, para que se desenvolva um MCA representativo da área de estudo, é necessário que as investigações da área contaminada sejam conduzidas seguindo as etapas sequenciais de avaliação e investigação, em conformidade com os órgãos ambientais competentes, como a CETESB, no caso do estado de São Paulo. Adicionalmente, é

necessário que sejam adotadas técnicas compatíveis com os objetivos de estudo. Por este ângulo, Riyis *et al.* (2013) afirmam que, mesmo quando seguidos os procedimentos previstos, muitas vezes esses não são suficientes para um diagnóstico adequado da área “por permitirem que sejam utilizadas tecnologias, métodos e abordagens inadequados” para que os objetivos principais da investigação sejam atingidos. Segundo o autor, tais objetivos são: encontrar a contaminação, estimar adequadamente a sua massa e determinar a interação dos contaminantes com o meio físico, subsidiando a avaliação de risco (RIYIS *et al.*, 2017).

Um diagnóstico errado ou uma investigação incompleta ou insatisfatória acarreta na proposição de um modelo conceitual com premissas inadequadas, como a definição dos meios hidrogeológico e geológico sendo praticamente homogêneos, o que não representa a realidade e prejudica a eficiência e eficácia das etapas seguintes do projeto (CHERRY, 2009; WELTY, 2012; GUIBEAULT *et al.*, 2005; PAYNE *et al.*, 2008; SUTHERSAN *et al.*, 2015; apud RIYIS, 2017).

Neste sentido, uma área contaminada não apresenta condições geológica-hidrogeológicas homogêneas, predominando “variações nos aspectos do meio físico, tais como heterogeneidade de solos, diferentes litologias e condições hidrogeológicas específicas locais” (ALBERTO, 2010; CETESB, 2001). Assim, a caracterização de uma área contaminada deve preconizar pelo conhecimento detalhado das condições geológica-hidrogeológicas e pela distribuição e comportamento dos contaminantes, os quais são diretamente influenciados pelas heterogeneidades do meio físico local (ALBERTO, 2010).

De acordo com a Decisão de Diretoria nº038/2017/C, vigente atualmente, o relatório de uma investigação ambiental detalhada deve conter texto explicativo sobre os dados hidrogeológicos para todos os materiais identificados, isto é, porosidade total e efetiva e condutividade hidráulica, destacando as unidades hidroestratigráficas de importância para o transporte e a retenção dos contaminantes. Compreende-se, assim, que o estudo das heterogeneidades geológicas e hidrogeológicas é fundamental na caracterização do meio físico, uma vez que as características heterogêneas do meio determinam as diferentes zonas que caracterizam e regem o transporte dos contaminantes: zonas de fluxo, zonas de transporte e zonas de armazenamento, as quais promovem, ou não, a movimentação dos contaminantes nos meios geológicos-hidrogeológicos.

Nesse contexto, o relatório da Investigação Ambiental Detalhada, elaborado na área objeto de estudo, apresenta o meio geológico e hidrogeológico de maneira homogênea, com

base na descrição litológica obtida por meio de sondagens investigativas, que apresentam perfis com camadas litoestratigráficas compostas somente por areia, sendo diferenciadas apenas pela coloração que varia entre marrom, laranja, marrom amarelado e vermelha.

Conforme mencionado anteriormente, as camadas litoestratigráficas não apresentam homogeneidade devido aos processos de formação do solo que ocorrem ao longo de muitos anos e se compõem por materiais diversos, isto é, um solo não possui 100% de areia em sua matriz, sendo caracterizado por porcentagens, ainda que não predominantes, de silte e/ou argila. Em geral, a composição do solo não pode ser verificada com precisão em uma análise visual ou tátil, sendo necessária a análise granulométrica do solo para a sua correta caracterização e determinação de suas propriedades, fatores fundamentais na elaboração de um modelo conceitual adequado.

Ademais, pôde-se constatar que outro parâmetro de interesse para o entendimento e caracterização do meio físico não foi adequadamente determinado: a porosidade do solo. Na Investigação Ambiental Detalhada, tal parâmetro foi determinado por meio de consulta à literatura, utilizando um valor médio e considerando que todo o maciço é composto somente por arenito médio. Dessa forma, fica evidente que a referida investigação não considerou as diferentes camadas hidroestratigráficas e suas heterogeneidades, tendo considerado um solo inteiramente arenoso e sem variações em profundidades de até 30 metros, fato que prejudica a qualidade do modelo conceitual da área e o entendimento do transporte de contaminantes no meio físico local.

Adicionalmente à caracterização equivocada do meio físico, é possível mencionar outra variável que pode ter sua metodologia e alcance questionados: a condutividade hidráulica (K). De acordo com Paradis et al. (2014), a determinação da condutividade hidráulica do solo e da sua variabilidade no espaço é de suma importância, devido ao controle que essa exerce tanto no fluxo de água subterrânea como no transporte da massa de contaminantes e na magnitude de dispersão desses.

A Investigação Ambiental Detalhada em avaliação, conforme mencionado ao longo deste estudo, determinou um valor para a condutividade hidráulica do meio físico. Contudo, a metodologia e a espacialização da técnica utilizada, bem como o resultado obtido, podem ter sua representatividade discutida.

Em conformidade com a Investigação Ambiental Detalhada, foram realizados dois testes de condutividade hidráulica, por meio do método *Slug Test*. Tal técnica se caracteriza por ser um ensaio *in situ* e pode ser considerada a mais comum e consolidada técnica para o diagnóstico de áreas contaminadas no Brasil (FERRAZ et al., 2015). Entretanto, de acordo com Otero e Abreu (2016), o *Slug Test* da forma como tem sido executado no Brasil não permite identificar as heterogeneidades do meio geológico, as quais são cruciais para o controle da distribuição dos contaminantes.

Ademais, os valores de condutividade hidráulica proporcionados por meio do *Slug Test* são valores médios para o intervalo onde está instalada a seção filtrante do poço de monitoramento, que, de acordo com a ABNT (2007), deve ter, preferencialmente, 2 metros de comprimento. Sendo assim, o valor de K obtido pelo referido método considera a condutividade média de toda a extensão da seção filtrante, sem determinar os valores de K para as diferentes camadas litoestratigráficas que compõem o meio físico, isto é, sem considerar suas heterogeneidades.

De acordo com a discussão realizada anteriormente, o meio geológico-hidrogeológico se caracteriza por suas heterogeneidades, isto é, não é homogêneo, tampouco isotrópico, uma vez suas características e propriedades variam espacialmente, tanto vertical quanto horizontalmente. Ademais, entende-se que, devido à extensão do antigo lixão Santa Madalena, dois pontos investigativos não representam a totalidade do maciço e que a condutividade média calculada não corresponde à realidade. Sendo assim, considera-se que a técnica *Slug Test*, da forma em que foi aplicada, pode ser questionada quanto à representatividade, assim como as demais características do meio físico discutidas anteriormente.

Complementarmente à caracterização do meio físico, a Investigação Detalhada determinou o fluxo das águas subterrâneas, por meio do cálculo das cargas hidráulicas obtidas nos poços de monitoramento instalados, sendo apresentados dois mapas potenciométricos que representaram as aferições realizadas em julho e em dezembro de 2010, conforme pode ser observado nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Por meio da observação dos mapas potenciométricos apresentados, é possível notar que existem algumas divergências no que tange à direção do fluxo da água subterrânea. Apesar de o relatório final apontar que ambos os mapas indicam o fluxo para noroeste, é possível verificar que o mapa potenciométrico traçado com os dados de dezembro de 2010 (Figura 7) apresenta

um fluxo das águas encaminhado para diversas direções. A exemplo disso, pode-se verificar que a sul no maciço o fluxo da água está direcionado para nordeste, em direção ao curso hídrico superficial existente no entorno, enquanto na parte central do mapa é possível verificar o fluxo na direção norte e, mais à jusante do maciço, o fluxo direcionado para noroeste. Por outro lado, o mapa potenciométrico traçado com os dados de julho de 2010 apresenta um fluxo predominantemente direcionado para noroeste, desde a porção sul do maciço até sua porção norte.

As divergências mencionadas anteriormente podem ser pontualmente observadas nas proximidades do PM-23, onde há a indicação do fluxo para nordeste no mapa elaborado em dezembro, enquanto no mapa elaborado em julho há a indicação do fluxo para noroeste. O mesmo cenário de caráter divergente pode ser observado próximo ao PM-24, sendo verificada a indicação do fluxo para nordeste no mapa elaborado em dezembro, enquanto é possível observar o fluxo direcionado para oeste no mapa elaborado em julho.

Além disso, observa-se que grande parte das linhas equipotenciais apresentadas nos mapas são inferidas, uma vez que não há dados suficientes para a determinação dessas e, conseqüentemente, do fluxo das águas subterrâneas, fato que pode justificar algumas anomalias observadas nos mapas potenciométricos.

Sendo assim, considerando as mudanças naturais que ocorrem no fluxo subterrâneo em diferentes períodos sazonais, conforme foi possível observar por meio dos mapas potenciométricos elaborados na ID, entende-se necessária a aferição e o acompanhamento sazonal dos fluxos das águas subterrâneas, a fim de verificar se há a dispersão de contaminantes para outras direções que sejam diferentes do fluxo preferencial verificado na ID. Além disso, é recomendável a instalação de poços de monitoramento estrategicamente localizados, visando a determinação do fluxo subterrâneo nas regiões onde os dados dos mapas potenciométricos foram inferidos.

Portanto, conforme abordado no presente estudo, dadas as limitações dos métodos utilizados pela Investigação Ambiental Detalhada, no que tange à caracterização do meio físico, entende-se que as informações e dados levantados apresentaram inconsistências e incertezas atreladas principalmente à generalização das características levantadas, uma vez que não foram consideradas as heterogeneidades existentes, como pôde ser observado na determinação da litologia e de suas propriedades.

Ademais, entende-se que a caracterização realizada no antigo Lixão Santa Madalena não contemplou toda a extensão do maciço, fato que gera lacunas espaciais de informações. Além disso, a Investigação Detalhada não realizou estudos e investigações relativos à fonte de contaminação, isto é, o maciço de resíduos, tampouco caracterizou e delimitou tal fonte, conforme é exigido pela DD 038.

Tal entendimento supõe que os resultados obtidos na investigação acarretam um Modelo Conceitual da Área inconsistente e prejudicam as análises posteriores exigidas pela CETESB, tal como a caracterização do comportamento dos contaminantes no meio físico ao longo do tempo, entre outras análises e avaliações que subsidiam a tomada de decisão quanto ao futuro da área contaminada, tal como a Avaliação de Risco à Saúde Humana.

5.1.2. Delimitação da pluma de contaminação e cálculo das massas dos contaminantes

Além da investigação do meio físico, a DD 038 prevê a quantificação e caracterização da contaminação por meio da determinação das concentrações das SQIs, exigindo a delimitação tridimensional das plumas de contaminação e o cálculo das massas dos contaminantes encontrados nas diferentes unidades hidroestratigráficas identificadas (CETESB, 2017). Embora a Decisão de Diretoria nº103/2007/C/E, vigente na época da elaboração da Investigação Ambiental Detalhada no antigo lixão, não exigisse o cálculo da massa de contaminantes nas diferentes unidades hidroestratigráficas, a referida DD recomendava preferencialmente a aplicação de técnicas de remediação que têm como meta a redução da massa de contaminantes, estando em conformidade com o que estabelece o Decreto nº59.263, de 5 de junho de 2013 (SÃO PAULO, 2013).

Assim, apesar de não ser exigido pela DD 103/2007 em quaisquer etapas do GAC, o cálculo da massa de contaminantes seria completamente necessário, uma vez que os relatórios de remediação deveriam ser conclusivos quanto à eficiência/eficácia do sistema remediador com relação à diminuição da massa de contaminantes presentes em uma área contaminada, o que só seria possível com a determinação da massa de contaminantes. Riyis et al. (2017) afirmam que, “para que a massa seja removida, é preciso que o MCA tenha definido de forma clara a quantificação dessa massa, onde ela está e qual é a sua interação com o meio físico” e que tal definição seja refinada durante as etapas de diagnóstico, ou seja, durante as etapas investigativas.

Por meio da avaliação da Investigação Ambiental Detalhada, verificou-se que as massas de contaminantes presentes nas matrizes ambientais do antigo Lixão Santa Madalena não foram calculadas, o que pode ser justificado pela falta de orientações da DD vigente na época de elaboração do estudo, no que tange à determinação dessas massas. Contudo, atualmente e de acordo com a DD 038, uma das principais perguntas a serem respondidas ao longo da investigação de uma área contaminada é: “qual é a massa de contaminante que precisa ser remediada? ”, sendo uma exigência da CETESB a determinação dessa massa na Investigação Ambiental Detalhada.

Sendo assim, é recomendável o cálculo da massa de contaminantes, a fim de subsidiar as etapas posteriores do GAC. Dessa forma, o sistema de remediação, quando necessário, pode ser planejado e dimensionado de maneira mais assertiva, a partir de um valor de massa de contaminante consistente, evitando futuros custos adicionais ou a ineficiência do sistema.

No que tange à delimitação da contaminação, foi verificado que a ID indicou a existência de plumas de contaminantes na água subterrânea local, sendo que essas foram traçadas para os seguintes metais: Al, Pb, Co, Fe e Mn. Por meio da observação dos mapas das plumas de contaminação, foi possível constatar que todas as plumas traçadas, para cada um dos elementos mencionados, não estão delimitadas, principalmente em suas porções nordeste, oeste e sudoeste. Observa-se também que nessas porções do entorno da área sob investigação não foram instalados poços de monitoramento, conforme pode ser observado nas Figuras 8 e 9 apresentadas anteriormente.

O relatório final explica que a localização e a profundidade dos poços de monitoramento instalados para a ID foram escolhidos com base nos resultados obtidos no levantamento geofísico, sendo verificado que as instalações dos poços ocorreram predominantemente em locais que apresentaram menores valores de resistividade, isto é, onde ocorre a possível dispersão de contaminantes no meio. Portanto, o método utilizado e a análise realizada a partir dos resultados geofísicos tendem a indicar localizações em que há maiores concentrações de contaminantes, sendo identificados os pontos e profundidades onde ocorrem os *hot spots*.

Sendo assim, entende-se que as localizações dos poços, da maneira que foi escolhida, não proporcionam resultados que permitam a delimitação da pluma de contaminação, uma vez que os pontos de investigação ficam limitados às áreas onde ocorrem as maiores concentrações de contaminantes ou em regiões onde não foram verificadas anomalias significativas nos

ensaios geofísicos. Tal constatação pode ser observada por meio da Figura 31, especialmente na localização dos poços PM-17 e PM-18, os quais foram instalados em regiões que apresentam maiores e menores anomalias, respectivamente.

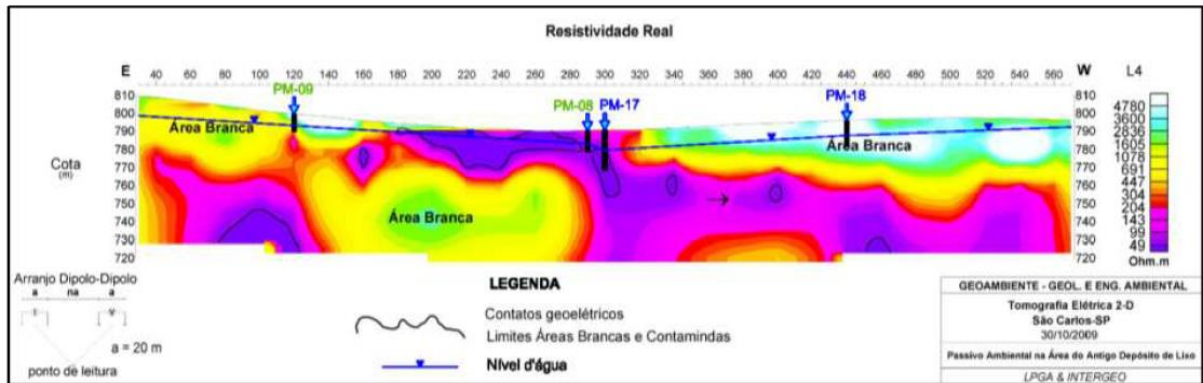


Figura 31 - Resultados obtidos nos ensaios geofísicos da ID

Fonte: PMSC (2010)

Portanto, uma vez que os poços de monitoramento foram predominantemente instalados nos *hot spots* ou em regiões com menores anomalias, não foi possível delimitar horizontalmente as plumas de contaminação, as quais permaneceram com suas extensões indefinidas.

A partir das observações realizadas por meio da avaliação da Investigação Detalhada, no que tange às plumas de contaminação, entende-se que as amostragens dos poços de monitoramento instalados permitiram identificar a contaminação da área e os respectivos contaminantes presentes nas águas subterrâneas. Contudo, a investigação não contemplou a delimitação das plumas de tais contaminantes, uma vez que não investigou horizontalmente a dispersão desses.

Cabe mencionar que o relatório final da ID e da ARSH apresenta como um de seus objetivos “Identificar por meio de análises químicas a concentração de compostos orgânicos e metais, eventualmente presentes no solo e água subterrânea, de modo a concluir a respeito da existência ou não de passivos ambientais”. Dessa forma, verifica-se que o objetivo definido para a investigação em questão está em conformidade com o que é exigido na etapa de Investigação Confirmatória do GAC, em detrimento do objetivo da Investigação Detalhada, que corresponde ao detalhamento e caracterização do meio físico e da contaminação, de acordo com a CETESB (2017).

Em suma, a investigação detalhada não apresentou informações e caracterização especialmente representativas, nem horizontalmente, tampouco em profundidade, do meio

físico e da contaminação existente na área investigada. Além disso, no que tange à caracterização química do meio, foi verificada a ausência do cálculo da massa de contaminantes, o qual não era uma exigência da CETESB na época da investigação, mas que atualmente é considerada informação essencial e é exigida para a composição do modelo conceitual e para possíveis medidas de intervenção, sejam de remediação, de engenharia ou de controle institucional.

5.1.3. Análise de Risco

De acordo com a DD 038, a Avaliação de Risco deve ser elaborada considerando todas as informações geradas nas etapas anteriores do GAC, especialmente no Modelo Conceitual gerado ao final da Investigação Detalhada – MCA 3, o qual deve compilar e interpretar as informações obtidas, a fim de subsidiar a execução da etapa de Avaliação de Risco, sendo fundamental para o planejamento e execução das etapas do Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas. A partir da análise do relatório final, pôde ser observado que o MCA 3 não foi apresentado, o qual deveria conter informações suficientes e consolidadas que representassem a realidade do meio físico e dos contaminantes presentes na área, conforme exigido pela CETESB (2017).

A partir disso, entende-se que a execução da Avaliação de Risco à Saúde Humana foi defasada em decorrência da ausência de um MCA 3 e da qualidade das informações proporcionadas pela Investigação Detalhada, tais como dados hidrogeológicos e parâmetros físico-químicos do meio físico local, conforme discutido anteriormente. Além disso, observou-se que, em relação às atuais exigências da CETESB para a ARSH, o relatório final não contemplou alguns dos requisitos considerados essenciais para a elaboração do Modelo Conceitual 4 que deve ser apresentado como produto da Avaliação de Risco.

O MCA 4 se caracteriza por ser um relato escrito, acompanhado de representação gráfica, dos processos associados ao transporte das SQIs na área sob investigação, abordando desde as fontes potenciais de contaminação, primárias e secundárias, até os potenciais ou efetivos receptores. Ademais, o MCA 4 deve conter a identificação das SQIs, as fontes de contaminação, os mecanismos de liberação das substâncias, os meios pelos quais tais substâncias são transportadas, as unidades de exposição e as vias de ingresso das substâncias nos receptores (CETESB, 2021).

Considerando as exigências contidas na DD038 para o relatório de Avaliação de Risco, foi possível verificar que a ARSH realizada para a área em estudo não indicou a existência de unidades de exposição, isto é, das áreas que se caracterizam por conter receptores expostos, considerando os caminhos de exposição e as substâncias químicas de interesse identificadas. Além disso, a ARSH também não contemplou os referidos caminhos de exposição, os quais representam os percursos desenvolvidos por uma determinada SQI, desde a fonte de contaminação até o receptor ou potencial receptor. Cabe destacar que a maior parte das exigências nessa etapa do GAC solicita cálculos e análises que consideram cada uma das unidades e cada um dos caminhos de exposição. Dessa forma, entende-se que as análises e cálculos realizados pela ARSH não contemplam completamente as exigências de um Modelo Conceitual representativo.

Além disso, a ARSH apresenta mapas de risco, indicando os receptores identificados, contudo não indica a localização dos *hot spots*, ou seja, as porções da área contaminada, onde são detectadas as maiores concentrações de SQIs, conforme pode ser verificado na Figura 32 apresentada a seguir.

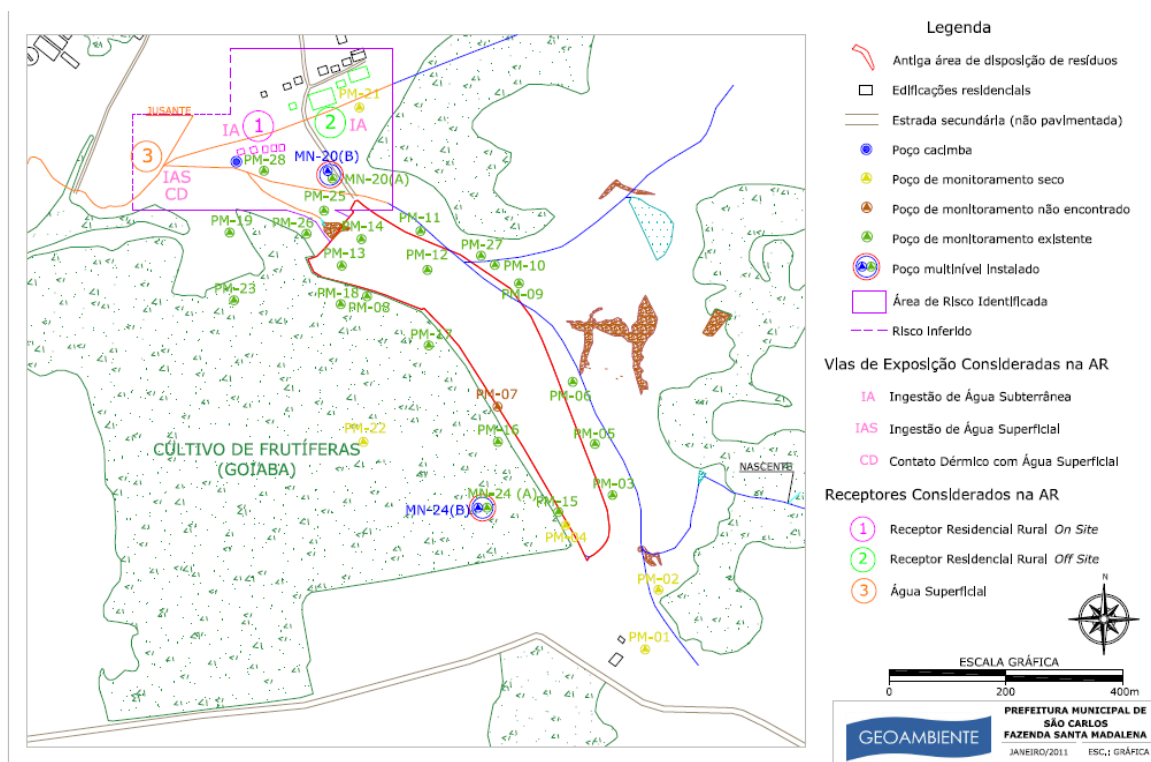


Figura 32 - Mapa de risco
Fonte: PMSC (2010)

Por meio da Figura 32, é possível verificar que a ARSH indicou as vias de exposição dos receptores, tais como a ingestão da água subterrânea e superficial e o contato dérmico, assim como indicou os receptores considerados na avaliação, os quais correspondem à água superficial e os receptores residenciais rurais, adultos e crianças. Além disso, foi determinada uma área de risco, cuja delimitação não teve seus critérios esclarecidos, sendo possível também notar que não estão representadas as unidades de exposição, tampouco os caminhos de exposição.

No que tange às substâncias químicas de interesse utilizadas na avaliação de risco, foram considerados todos os elementos que apresentaram concentrações acima dos valores de intervenção da CETESB (2005) nas análises químicas de águas superficiais e subterrâneas realizadas em dezembro de 2010, sendo eles: Al, Ba, Bo, Pb, Co, Cu, Fe, Mn e Zn. Contudo, a partir do estudo da Investigação Detalhada e da ARSH, foi possível notar que a primeira etapa de amostragem da ID, a qual ocorreu em julho de 2010, identificou concentrações superiores aos valores orientadores dos seguintes elementos: antimônio (Sb), arsênio (As), mercúrio (Hg) e selênio (Se). Já as amostragens realizadas em dezembro de 2010 não apresentaram concentrações dos quatro elementos supracitados, os quais não foram considerados na avaliação de risco.

Cabe ressaltar que o mês de julho corresponde a um período com menor disponibilidade hídrica e, conseqüente, maior concentração de contaminantes no lixiviado, enquanto o mês de dezembro se caracteriza por ser um período com maior disponibilidade hídrica, o que acarreta menores concentrações de contaminantes no líquido percolado.

A partir de tais constatações, verificou-se que a ARSH considerou somente os metais que apresentaram concentrações superiores aos valores de intervenção da CETESB em dezembro de 2010, isto é, os elementos Sb, As, Hg e Se não foram considerados na avaliação de risco, apesar de terem sido verificados em campanhas iniciais. Dessa forma, entende-se que os quatro elementos citados deveriam ter sido considerados na Avaliação de Risco à Saúde Humana, uma vez que suas concentrações foram verificadas acima do VI, em um período que há maior concentração de contaminantes no lixiviado, em oposição ao que ocorre em períodos mais chuvosos, nos quais o lixiviado é diluído, proporcionando a obtenção de menores concentrações de contaminantes e, muitas vezes, a não detecção desses.

Sendo assim, os resultados obtidos pela ARSH podem ser considerados incompletos no que tange ao cumprimento das exigências da CETESB, para a avaliação de cenários reais e/ou hipotéticos, assim como no que diz respeito à consideração das SQIs na avaliação de risco, sendo recomendada a elaboração de nova Avaliação de Risco à Saúde Humana, a partir de dados consistentes proporcionados por uma nova Investigação Detalhada, as quais devem ser conduzidas em conformidade com as exigências da Decisão de Diretoria 038/2017/C e do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (2021).

5.1.4. Medidas de intervenção e recomendações

As medidas de intervenção devem ser elaboradas e sugeridas após a finalização do Modelo Conceitual 4, isto é, ao final da etapa de Avaliação de Risco. Tais medidas são ações previstas no Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas e são necessárias quando na avaliação de risco forem identificadas fontes de contaminação primária ou secundária ativas, riscos e/ou danos aos bens a proteger acima dos níveis aceitáveis.

Conforme abordado anteriormente, apesar de a ARSH elaborada para a área em estudo ter apresentado inconsistências e ser considerada incompleta, tal avaliação verificou, para os compostos químicos selecionados (Pb, Co, Fe e Mn), riscos cumulativos não carcinogênicos para a exposição à água subterrânea por ingestão para todos os receptores considerados (residencial rural – crianças e adultos). Ademais, a ARSH apontou as Concentrações Máximas Aceitáveis e o fator de redução necessário para que não seja verificado risco à saúde humana. Dessa forma, a partir dos riscos identificados, o relatório final apresenta medidas de intervenção, em âmbito de controle institucional.

As primeiras medidas de intervenção propostas no relatório final são relativas ao tamponamento do poço cacimba existente na região, uma vez que foi identificado risco não carcinogênico cumulativo para Fe e Mn por ingestão das águas subterrâneas, além da restrição do uso das águas superficiais, até que seja identificada influência do maciço de resíduos nessas águas e que não sejam detectados teores de contaminantes acima das CMAs.

Ademais, o relatório final sugere como medida de intervenção a restrição do plantio de espécies vegetais para o consumo humano em toda a área do aterro e em áreas onde foram identificadas contaminação pelos compostos de interesse, além de sugerir a análise dos tecidos vegetais das plantações existentes na região para a avaliação da existência ou ausência de contaminantes em suas estruturas.

Por fim, a última medida de intervenção proposta sugere o impedimento da instalação de poços de captação de água subterrânea considerando um raio mínimo de 500 metros a partir da área de estudo. A determinação de tal medida foi justificada devido ao fato de as plumas de contaminação estarem abertas, tanto à montante, quanto à jusante, isto é, não há o conhecimento sobre a real extensão das plumas, vertical e horizontalmente. Assim, o relatório final sugere que, até que seja conhecida toda a extensão da área atingida pela contaminação, não sejam instalados poços de captação no entorno considerado.

Sendo assim, conforme pode ser observado na Figura 9, a área determinada para a restrição do plantio e investigação da acumulação de metais nos tecidos vegetais, bem como a área de restrição à instalação de poços de captação de água subterrânea, foram delimitadas sem critérios explícitos para a escolha dessas, uma vez que não foram realizadas análises de risco internamente às áreas propostas para as medidas de restrição. Dessa forma, entende-se que não há fundamento teórico ou prático que justifique a escolha dessas áreas e que não houve investigação suficiente da extensão horizontal das plumas de contaminação, tampouco sua delimitação em profundidade, características que, em conformidade com a DD 038, devem ser determinadas durante a etapa de investigação detalhada e que, conforme observado no relatório final, não foram contempladas na investigação conduzida na área em avaliação.

Ademais, além das medidas de intervenção, o relatório final proporcionou recomendações a partir dos resultados obtidos por meio da ID e da ARSH, tais como a continuidade dos trabalhos de diagnóstico ambiental, visando a delimitação das áreas afetadas, bem como a definição dos fatores que controlam a dispersão dos contaminantes dissolvidos na água subterrânea, além do monitoramento das águas superficiais e subterrâneas. Também foi recomendada uma nova Avaliação de Risco, após o mapeamento das contaminações existentes na área, para a determinação da real extensão das áreas de risco e das concentrações máximas a serem atingidas, além da avaliação de alternativas tecnológicas de remediação a serem implantadas no local, caso as concentrações dos contaminantes continuem ultrapassando das CMAs.

A partir do estudo do relatório final, de suas recomendações e medidas de restrição propostas, foi possível constatar que a Investigação Detalhada, bem como a Avaliação de Risco à Saúde Humana, conduzidas na área em estudo, não atingiram seus principais objetivos, sendo verificado que o próprio relatório final recomenda ações que têm como finalidade as atribuições

de uma Investigação Detalhada, além de recomendar a realização de uma nova Avaliação de Risco.

5.2. Análise de estudos acadêmicos na área de estudo

O presente trabalho teve como uma de suas etapas o levantamento dos estudos ambientais realizados no antigo Lixão Santa Madalena até o ano de 2022, o qual subsidiou a análise crítica no que tange à aplicabilidade de tais trabalhos em futuras investigações ambientais que possam ocorrer na área em avaliação. Tal levantamento contemplou 10 estudos, dentre os quais foram obtidos 5 artigos, 2 teses e 3 dissertações.

Verificou-se notadamente a evolução da qualidade e das abordagens dos estudos analisados, sendo constatado que os estudos mais antigos tiveram como principal foco a caracterização do meio físico local, por meio da utilização de metodologias capazes de indicar a ocorrência de anomalias que apontem a presença de contaminantes no maciço de resíduos. Por outro lado, os estudos mais recentes apresentaram predominantemente objetivos associados à caracterização da contaminação. Sendo assim, a partir da leitura dos trabalhos disponíveis, verificou-se que a contaminação local foi constatada em todos os estudos realizados na área em avaliação por meio de diversas metodologias e parâmetros indicadores, tais como as análises físico-químicas das águas superficiais e subterrâneas, a avaliação da ictiofauna nas águas superficiais adjacentes ao antigo lixão e, principalmente, os métodos geofísicos.

5.2.1. Caracterização do meio físico e da fonte de contaminação

Relativamente aos estudos que abordaram as características do meio físico, Ellert et al. (1990) revelaram a extensão da voçoroca, na qual foram dispostos resíduos de diversas origens. Destaca-se que o estudo realizado pelos autores ocorreu em 1990, quando o antigo lixão ainda estava em operação, proporcionando informações sobre a possível extensão desse dispositivo, que dificilmente seria estimada com precisão atualmente, uma vez que o maciço de resíduos se encontra encoberto por camadas de solo retirado do entorno do antigo lixão.

Sendo assim, entende-se que a constatação da extensão da voçoroca obtida por Ellert et al. (1990) pode ser utilizada na elaboração do Modelo Conceitual da Área, uma vez que proporciona dados relativos à delimitação da fonte de contaminação, em conformidade com o que exige a CETESB, para a etapa de Investigação Detalhada.

Considerando a caracterização e a delimitação das fontes de contaminação, as quais configuram uma exigência da DD038, estudos recentes, tais como o de Shinzato (2014), Morita & Wendland (2019a) e Morita (2020), apontaram o caráter não inerte dos resíduos depositados no maciço, mesmo após décadas de seu fechamento. Shinzato (2014) apontou a existência de resíduos plásticos que possivelmente compõem uma camada impermeabilizante, impedindo a infiltração dos contaminantes no meio. Morita & Wendland (2019b), por sua vez, também levantaram a hipótese da existência de camadas com materiais ainda não degradados, verificando um acúmulo de lixiviado a uma profundidade determinada, o qual pode ser liberado para o meio em decorrência de intervenção antrópica, de eventos naturais e da degradação desses materiais ao longo dos anos. Tais constatações levam ao entendimento da possível acumulação de contaminantes em camadas não conhecidas do maciço, uma vez que a disposição dos resíduos foi realizada de maneira irregular, e devido à diversidade de materiais depositados, cujas origens não são inteiramente conhecidas.

Sendo assim, visando a caracterização da fonte de contaminação, entende-se necessária a amostragem dos materiais que se encontram dispostos ao longo da extensão da antiga voçoroca, para que sejam realizados ensaios de solubilização e a caracterização da composição desses resíduos, visando não somente a constatação do caráter inerte ou não inerte, mas a determinação dos contaminantes presentes e das diversas características dos materiais depositados. Além disso, é recomendado que os pontos a serem utilizados para a obtenção das amostras sólidas sejam espaçados ao longo da extensão do maciço e que as amostras sejam coletadas em diferentes profundidades, considerando-se a profundidade da voçoroca estimada por Ellert et al. (1990). Ademais, a investigação do maciço deve proporcionar informações que possam ser utilizadas como base para a previsão do comportamento dos resíduos ao longo do tempo e as futuras consequências para o meio ambiente.

Neste sentido, no que tange à caracterização do lixiviado produzido pela fonte de contaminação, isto é, pelo maciço de resíduos, Shinzato (2014) constatou a mobilização de elementos contaminantes do maciço para o lixiviado, enquanto Morita & Wendland (2019a) verificaram que os resíduos não possuem caráter inerte. Tais constatações indicam que os resíduos presentes no maciço ainda liberam elementos contaminantes para o meio no qual se encontram, os quais devem ser identificados e caracterizados, a fim de proporcionar informações consistentes para a elaboração de um MCA representativo.

Considerando a necessidade do conhecimento da espacialização dos contaminantes no maciço e no meio físico, em extensão horizontal e vertical, em conformidade com as determinações da CETESB (2017), foram verificados diversos estudos geofísicos conduzidos na área em questão, sendo constatada a realização desse tipo de investigação desde, pelo menos, 1990. Dentre os estudos levantados e analisados, verificou-se que 4 deles utilizaram o método de eletrorresistividade, 2 utilizaram a tecnologia SEV e somente 1 estudo utilizou a metodologia de polarização induzida. Tais métodos foram classificados por Morita et al. (2021) como os mais utilizados na investigação dos lixões e aterros controlados estudados existentes em território nacional.

Os ensaios geofísicos realizados por Álvares (2000) proporcionaram resultados que levaram o referido autor a concluir que a interação entre o meio físico, os resíduos depositados e os líquidos percolados são responsáveis pela baixa resistividade, sendo que esse parâmetro também apresenta menores valores com o aumento da profundidade. Tais constatações indicaram a contaminação do meio proveniente do maciço de resíduos, assim como foi constatado por Ellert et al. (1990), que também verificaram, por meio da aferição da condutividade elétrica do meio, a existência de anomalias que representam a presença de contaminantes. Velozo (2006), por sua vez, verificou de maneira semelhante e também a partir de métodos geofísicos a contaminação do meio até a profundidade de 25 metros, enquanto Morita (2020), utilizando uma metodologia similar com maior alcance, constatou que a contaminação local alcança 40m de profundidade e 200m de extensão.

Os métodos geofísicos são comumente utilizados para a escolha da localização dos pontos a serem investigados, bem como para a determinação das profundidades de instalação dos poços de monitoramento, e, quando utilizados adequadamente, proporcionam informações que indicam as regiões que apresentam maiores e menores concentrações de contaminantes a partir das anomalias verificadas por meio da resistividade.

Contudo, conforme discutido anteriormente, entende-se que os pontos de investigação normalmente são determinados a partir da escolha das regiões que apresentam maiores concentrações de contaminantes, ou seja, nas regiões que representam os *hot spots*. Dessa forma, ao serem escolhidas somente as regiões com menores valores de resistividade, isto é, com maiores concentrações de contaminantes, não é possível delimitar a pluma de contaminação, uma vez que os pontos de investigação ficam restritos às regiões com maior massa de contaminantes. Sendo assim, é recomendável a instalação de poços nas adjacências

dos *hot spots*, a fim de obter os limites das plumas de contaminantes, o que configura uma das exigências da DD038, no âmbito da investigação detalhada.

A partir dos estudos acadêmicos analisados, verificou-se que os resultados encontrados por meio dos métodos geofísicos indicaram predominantemente a presença de lixiviado no maciço de resíduos, bem como nas águas subterrâneas, conforme verificado por Shinzato (2014) e por Morita & Wendland (2019a). No que tange ao lixiviado produzido pela fonte de contaminação, foram observadas, por meio da amostragem desse líquido, concentrações acima dos valores determinados pelo Decreto Estadual nº 8468 para diversos elementos contaminantes, fato que indica que o lixiviado gerado pelos resíduos dispostos no maciço não poderia ser lançado no meio ambiente sem o devido tratamento (SHINZATO, 2014).

Morita & Wendland (2019a), por sua vez, verificaram resultados para o lixiviado que apontaram que os valores de condutividade elétrica, DQO e alcalinidade reduziram em até 90% em comparação com estudos realizados por Schalch (1992) e por Shinzato (2014). Contudo, apesar dessa constatação, os autores afirmam que as concentrações de contaminantes remanescentes ainda são altas e potencialmente geradoras de riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

Além disso, conforme mencionado anteriormente, os supracitados autores levantaram hipóteses relativas à existência de possíveis camadas impermeabilizantes no maciço. Shinzato (2014), que observou camadas com teor de argila em seu estudo de investigação do meio, sugeriu a existência de lençóis suspensos de lixiviado, o qual caracterizou como imóvel e com altas concentrações de contaminantes. A autora também verificou que os resíduos depositados foram dispostos de maneira mal adensada e sem qualquer tipo de padronização, fato que promove a existência de espaços vazios que contribuem para a entrada e para o armazenamento de águas pluviais e de lixiviado no maciço.

Complementarmente, Morita & Wendland (2019a) verificaram maiores concentrações de contaminantes no lixiviado coletado a uma profundidade de 2,85 metros, além de terem verificado a influência da sazonalidade na qualidade do lixiviado gerado, constatando a maior diluição dos contaminantes no período chuvoso e, conseqüentemente, menores valores de concentração dos elementos causadores de contaminação dos solos e das águas. Sendo assim, é recomendável que as amostragens de lixiviado, bem como das águas subterrâneas, sejam

realizadas em diferentes períodos sazonais, uma vez que a disponibilidade hídrica influencia a diluição e a concentração de contaminante nessas matrizes.

Além da caracterização da fonte de contaminação, a DD038 exige a caracterização do meio físico, de suas propriedades e especificações. Neste sentido, os estudos acadêmicos levantados neste trabalho contemplaram a caracterização do meio físico, obtendo resultados que diferem dos resultados alcançados pela investigação detalhada. A composição das camadas litoestratigráficas presentes na área-objeto de estudo e em seu entorno foram investigadas inicialmente por Álvares (2000) que, utilizando-se das perfilagens geofísicas, indicou a presença de acamamentos siltosos e argilosos, cujas espessuras variam de decímetros a metros.

Além disso, por meio dos resultados obtidos por ensaios granulométricos, o referido autor afirma que tais sedimentos são predominantemente arenosos, com textura fina a média, apresentando porções de argila e indicando também a existência de camada rochosa resistiva na área objeto de estudo. Tais constatações, realizadas por Álvares (2000), indicam a existência de um meio físico que apresenta caráter heterogêneo, ou seja, apresenta camadas litoestratigráficas com diferentes composições e texturas, que variam de acordo com os teores de areia, silte e argila. A partir das observações do autor, pode-se confirmar o caráter equivocado da Investigação Detalhada conduzida na área em estudo, a qual considerou o meio físico homogêneo composto somente por areia média, determinando suas variáveis e propriedades com base na homogeneidade das camadas litoestratigráficas.

Estudos posteriores elaborados por Shinzato (2014) também indicaram a presença de argilas na composição do perfil litológico local, por meio da análise granulométrica. Velozo (2006), por sua vez, apontou que as argilas verificadas localmente possuem baixa capacidade de troca catiônica e, portanto, baixa capacidade de retenção dos contaminantes. Esta afirmação esteve em desacordo com Gadotti (1997), o qual afirmou que a formação geológica local demonstrou alta capacidade de atenuação da contaminação em conformidade com os resultados obtidos em seus estudos.

No que diz respeito à caracterização do meio físico e suas propriedades, além de terem sido descritas amostras do solo local e de terem sido levantadas hipóteses sobre a retenção de contaminantes pela hidrogeologia local e sobre a capacidade de atenuação desses, também foram realizados ensaios de infiltração *in situ*, por meio dos quais foi obtido o valor de 10^{-5} m/s para a condutividade hidráulica (VELOZO, 2006). Tal valor representa solos

predominantemente arenosos, em conformidade com o que foi verificado por Álvares (2000) e também utilizado na Investigação Ambiental Detalhada, conforme mencionado anteriormente.

Entretanto, apesar de Velozo (2006) ter constatado um valor de condutividade hidráulica semelhante ao obtido na Investigação Detalhada, entende-se que, devido ao caráter heterogêneo do perfil litoestratigráfico local, conforme discussões anteriores, não é recomendável a generalização de tal propriedade hidráulica para todo o meio físico, uma vez que diferentes camadas hidroestratigráficas apresentam diferentes propriedades, as quais, por sua vez, regem o transporte dos contaminantes, determinando as zonas de fluxo, de contenção e de armazenamento destes, em conformidade com a sua composição e textura.

Tal entendimento não limita totalmente a utilização do valor da condutividade hidráulica obtida por Velozo (2006) e pela Investigação Detalhada, desde que sejam determinadas as camadas que apresentam tal valor de K, bem como as camadas que apresentam valores diferentes para essa propriedade, visando a conformidade com o que exige a DD038, ao mencionar o dever da representação e apresentação de texto explicativo sobre os dados hidrogeológicos, tais como a porosidade total e efetiva e a condutividade hidráulica, de cada unidade hidroestratigráfica, destacando aquelas que são importantes para o transporte e retenção dos contaminantes.

5.2.2. Delimitação da pluma de contaminação e cálculo das massas dos contaminantes

No que tange à contaminação das águas subterrâneas, o estudo de Morita *et al.* (2021) revelou que, nos lixões estudados existentes em território nacional, os parâmetros que são mais observados com concentrações acima da legislação vigente são os coliformes, Pb, Fe, Cl e Cd. Em conformidade com esse levantamento, Morita & Wendland (2019b) constataram concentrações nas águas subterrâneas de Pb, Fe, Mn e Cd acima dos padrões vigentes em 2020, os quais correspondem à Decisão de Diretoria 256/2016 da CETESB e à Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde, que foram atualizadas em 2021 pela Decisão de Diretoria 125/2021 (CETESB, 2021) e pela Portaria nº888 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021), respectivamente.

Os resultados obtidos por Morita & Wendland (2019b), conforme mencionado anteriormente, revelaram concentrações superiores aos valores orientadores para o Fe, Mn e Pb, o que esteve em conformidade com o que foi verificado pela Investigação Detalhada, a qual apresentou mapas com as plumas de contaminação para tais elementos. Os resultados de Morita & Wendland (2019b) para o ferro, por exemplo, apontaram concentrações acima do valor

orientador em regiões internas ao maciço e à montante deste, conforme pode ser observado na Figura 33. A Figura 34, por sua vez, apresenta as plumas de contaminação por Fe elaboradas na Investigação Detalhada.



Figura 33 - Contaminação por Fe em 2019

Fonte: Morita (2019b)

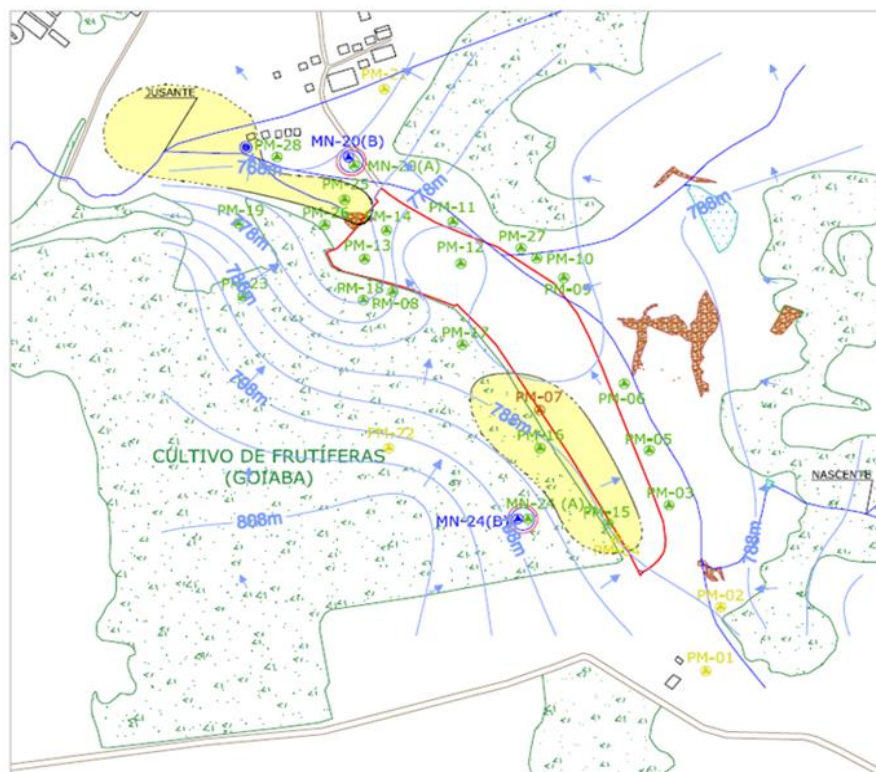


Figura 34 - Contaminação por Fe em 2010

Fonte: PMSC (2010)

A partir da observação da Figura 34, é possível verificar que as plumas de contaminação por Fe verificadas na investigação detalhada estão localizadas à jusante do maciço, na porção norte do entorno, e também na porção centro-sul, abrangendo o maciço e parte de seu entorno. Por outro lado, por meio da Figura 33, é possível notar que foram verificadas concentrações de Fe acima do padrão de potabilidade em regiões localizadas no interior do maciço e à montante desse. Tais constatações indicam que a pluma de contaminação por Fe, obtida na investigação detalhada, não está condizente com os resultados de estudos mais recentes desenvolvidos na área em questão, tal como o estudo de Morita & Wendland (2019b), cujas análises foram realizadas em 2017, isto é, 7 anos após as investigações realizadas no contexto do GAC.

Dessa forma, tomando como base a análise dos resultados obtidos para o ferro, verifica-se que as plumas de contaminação traçadas na investigação detalhada não correspondem mais à realidade da contaminação da área em estudo, não sendo recomendável a consideração dessas para a tomada de decisões sobre o futuro da área que abriga o antigo Lixão Santa Madalena. Além disso, recomendam-se novas investigações para os parâmetros obtidos na investigação detalhada e no estudo de Morita & Wendland (2019b), bem como é recomendada a delimitação das atuais plumas de contaminantes, uma vez que esses ainda são liberados pelo maciço de resíduos e são transportados através do meio físico ao longo do tempo, conforme abordado anteriormente.

Conforme pôde ser observado ao longo deste estudo, a maioria dos autores dos trabalhos levantados, principalmente os que apresentaram análises das águas subterrâneas, caracterizaram os pontos de investigação em relação à localização desses, isto é, foram consideradas localizações à jusante, à montante e no interior do maciço, com base na direção do fluxo das águas subterrâneas, o qual foi abordado inicialmente por Ellert et al. (1990), que afirmou, por meio de métodos geofísicos, sobre a existência de uma “tênue nuvem de contaminantes” que ruma para oeste, sul e leste.

Por outro lado, Gonçalves, Bossolan e Orlando (1992), por meio da instalação de piezômetros, definiram o fluxo das águas subterrâneas para noroeste, em conformidade com o que também foi verificado por Álvares (2000) e por Velozo (2006), enquanto Gadotti (1997), por meio do cálculo das cargas hidráulicas, obteve um fluxo que ruma para sudoeste. Cabe mencionar que a investigação detalhada apontou a direção predominante do fluxo das águas subterrâneas para noroeste, também por meio do cálculo das cargas hidráulicas. Contudo, conforme mencionado anteriormente, a ID apresenta dois mapas potenciométricos, por meio

dos quais é possível observar divergências no que tange à direção do fluxo das águas subsuperficiais, uma vez que foram obtidos em diferentes períodos sazonais.

Sendo assim, é possível notar que diferentes metodologias de obtenção da direção do fluxo subterrâneo apresentam diferentes resultados, sendo que 3 dos 5 estudos levantados, que buscaram obter a direção do fluxo das águas subsuperficiais, indicaram a direção desse para noroeste, correspondendo à direção do escoamento superficial e dos cursos d'água superficiais, sendo predominantemente verificada por meio dos ensaios geofísicos realizados na área em estudo.

Dessa forma, entende-se que o fluxo das águas subterrâneas para a direção noroeste pode ser considerado em futuras investigações, contudo cabe a tais investigações a elaboração de mapas potenciométricos representativos, que considerem os diferentes períodos sazonais, os quais configuram uma exigência da DD038 e ainda não foram obtidos, principalmente no contexto do GAC, conforme abordado anteriormente.

Complementarmente, no que tange ao alcance da influência do maciço de resíduos em seu entorno, os cursos hídricos superficiais locais também foram investigados em alguns dos estudos levantados. O principal curso d'água verificado no entorno do antigo lixão é o Córrego São José, o qual percorre as porções norte e noroeste das imediações do antigo lixão, estando distanciado da área em avaliação em, aproximadamente, 300 metros. O Córrego São José é classificado como classe II, em conformidade com o Decreto nº10.755, de novembro de 1977, e suas alterações, e suas águas podem ser destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional, à irrigação de hortaliças ou plantas frutíferas e à recreação de contato primário, tal como a natação.

Considerando-se a importância de tal curso hídrico, Velozo (2006), que apontou a existência de acamamentos silto-argilosos e de camada rochosa resistiva no maciço, afirmou que tais constatações indicam um cenário que possibilita o escoamento dos contaminantes até as águas superficiais, o que havia sido identificado por Álvares (2000), por meio da amostragem de água superficial à jusante no maciço de resíduos, constatando a contaminação dessas águas. Os principais parâmetros indicadores dessa condição foram a alcalinidade, os cloretos, a condutividade elétrica e a DQO. Gadotti (1997) também constatou indicativos da contaminação nas águas superficiais, verificando altas concentrações de cloretos e de condutividade elétrica nas medições e análises realizadas com as águas do Córrego São José.

Ademais, outro estudo que contribuiu para a verificação de contaminação nas águas superficiais adjacentes ao antigo lixão foi o estudo elaborado por Resende *et al.* (2014), o qual abordou a análise ecológica da ictiofauna no referido córrego, em 2007, apontando que à jusante do maciço de resíduos há maiores valores indicativos de contaminação, além de espécies de peixes tolerantes à poluição, fatores que indicam a alteração da qualidade das águas superficiais adjacentes ao lixão Santa Madalena.

No que tange às investigações no âmbito do GAC e às exigências da CETESB por meio das diretrizes da DD 038, não são verificados requisitos de investigação relativos às águas superficiais do entorno das áreas contaminadas para a Investigação Detalhada, sendo citado, como exigência da ID, somente o estabelecimento das relações hidráulicas entre as águas subterrâneas e os corpos d'água superficiais, poços de captação, nascentes e sistemas de drenagem.

Contudo, a análise das águas superficiais volta a ser abordada na DD 038, no âmbito da Avaliação de Risco e da Identificação de Risco considerando Padrões Legais Aplicáveis, a qual é necessária nos casos em que os contaminantes gerados na fonte de contaminação possam atingir corpos d'água superficiais ou subterrâneos, ultrapassando os padrões legais aplicáveis, comprovados por meio de modelagem do transporte de contaminantes.

Sendo assim, entende-se que os estudos acadêmicos que investigaram a qualidade das águas superficiais proporcionaram informações que tangem à Avaliação de Risco, especificamente o Risco considerando Padrões Legais Aplicáveis, além do que é exigido para a investigação detalhada. Ademais, considera-se que tais estudos podem servir como incentivo à investigação dos corpos hídricos superficiais, se constatadas relações hídricas entre estes e as águas subterrâneas na ID, a fim de verificar a influência do maciço nos cursos superficiais.

5.2.3. Análise de risco, medidas de intervenção e recomendações

Conforme pôde ser observado por meio da análise dos estudos acadêmicos levantados relativos ao antigo lixão Santa Madalena, não foram realizadas análises de risco à saúde humana, tampouco análise de risco ecológico. Alguns dos estudos, a partir dos resultados obtidos, mencionam a possibilidade de risco à saúde pública, contudo, não apresentam análises que comprovem a existência desse risco.

No que tange às conclusões e recomendações proporcionadas pelos estudos analisados, em 1990, Eller *et al.* apontaram para a grande problemática envolvida na disposição de resíduos, afirmando que a disposição de rejeitos em voçorocas e ravinas revela um elevado risco de contaminação, notadamente quando se situam em zonas de recarga do aquífero, como é o caso do lixão Santa Madalena. Ellert *et al.*, (1990) ainda afirmaram que, se por um lado o problema da existência da voçoroca é minimizado pela disposição de resíduos nesta, por outro, tal atividade representa um elevado custo quanto à qualidade das águas subterrâneas, uma vez que, quando esse recurso é comprometido, requer altos custos para ser recuperado. Neste sentido, Resende *et al.* (2014) destacaram a relevância da inativação dos lixões ainda existentes no Brasil e da recuperação das águas contaminadas por depósitos de resíduos sólidos.

Estudos posteriores, apoiados pelas constatações da contaminação local, investigaram a área em questão, apresentando recomendações para a continuidade dos estudos, não só no antigo Lixão Santa Madalena, como em todos os depósitos de resíduos desativados, conforme recomendou Shinzato (2014), afirmando sobre a urgente necessidade de pesquisas com foco na padronização de métodos de avaliação de lixões e na determinação de critérios que definam quando tais depósitos deixam de ser uma ameaça à saúde humana e ao meio ambiente.

Considerando a recomendação de Shinzato (2014), no que tange à padronização de procedimentos de avaliação de lixões, entende-se que a DD 038 e suas diretrizes contemplam os processos pertinentes à investigação de depósitos de resíduos, sendo abrangente quanto às exigências da investigação do meio físico e da contaminação e proporcionando diretrizes para um diagnóstico representativo dessas áreas contaminadas.

Contudo, entende-se também que a investigação de um depósito de resíduos não deve ser limitada às exigências da CETESB (2017), dada a sua complexidade, sendo recomendável o estabelecimento de procedimentos que contemplem as exigências da DD038 e, adicionalmente, exijam a realização de processos e a utilização de metodologias e tecnologias complementares que proporcionem informações detalhadas para a elaboração de um Modelo Conceitual completo, que não acarrete incertezas para a tomada de decisão em relação ao futuro dessas áreas contaminadas.

Sendo assim, é possível afirmar que, para o estabelecimento de procedimentos específicos para a investigação de lixões e aterros controlados, é necessário que tais dispositivos sejam estudados e investigados ao longo dos anos, o que, de acordo com Morita *et al.* (2021), não

ocorre nos depósitos de resíduos existentes no país. Portanto, para que sejam elaborados procedimentos voltados a esses dispositivos, recomenda-se o estudo aprofundado dos diversos lixões e aterros controlados existentes em território nacional e dos processos que ocorrem nestes, no que tange às temáticas ambientais, sociais, técnicas, econômicas e de saúde pública. Além disso, entende-se que tais estudos devem ser desenvolvidos não só pelos responsáveis legais dessas áreas, mas por meio de pesquisas desenvolvidas em universidades e pelo monitoramento contínuo da qualidade dos recursos ambientais afetados, em conformidade com o que recomenda Shinzato (2014).

Complementarmente, Shinzato (2014) recomendou, especificamente para o antigo lixão Santa Madalena, a elaboração de um mapa potenciométrico representativo da área, além da instalação de uma estação meteorológica no lixão para a realização da estimativa de um balanço hídrico no maciço e da quantidade de produção de lixiviado. Ademais, a autora sugeriu a coleta das águas subterrâneas, por meio da metodologia *low-flow*; a análise de variáveis importantes para os estudos hidrogeoquímicos no lixiviado e nas águas subterrâneas, tais como o potencial de oxirredução, cloretos, metano, gás sulfídrico, metais, oxigênio dissolvido, entre outros; e, por fim, a investigação do comportamento do ferro dentro do maciço, no lixiviado e nas águas subterrâneas mais detalhadamente, uma vez que este foi um elemento encontrado em altas concentrações no lixão.

Anos depois, a partir de seus estudos, Morita & Wendland (2019a) mencionaram a possibilidade de outros componentes, normalmente não amostrados em campanhas de monitoramento e amplamente encontrados em aterros, tais como os contaminantes emergentes, estarem sendo carreados para o entorno, proporcionando risco à saúde pública e aos ecossistemas. Morita & Wendland (2019b) também afirmam que as concentrações remanescentes de contaminantes verificadas no depósito de resíduos ainda oferecem risco à saúde pública e ao meio ambiente. Conforme mencionado anteriormente, nenhum dos estudos analisados realizou a avaliação de risco para a área em questão, contudo autores como Morita & Wendland (2019b) e Shinzato (2014) mencionam riscos e ameaças à saúde humana e ao meio ambiente, sem terem utilizado metodologias que comprovem tais riscos.

Por fim, verificou-se que os estudos levantados não mencionam a necessidade de medidas de intervenção na área em âmbito institucional, tampouco no que tange à remediação ou às técnicas de engenharia, com exceção do trabalho de Morita (2020), que estudou a inserção de uma cobertura impermeabilizante na área do maciço de resíduos, verificando que tal

cobertura foi ineficiente na diminuição da produção de lixiviado e proporcionou o avanço da degradação de matéria orgânica em decorrência do ambiente anaeróbico proporcionado pela impermeabilização.

5.3. Consolidação das informações existentes no âmbito do GAC

Em conformidade com os objetivos estabelecidos neste trabalho de graduação, a seguir estão apresentadas as principais considerações de interesse ambiental, para a continuidade das investigações a serem realizadas no antigo lixão, considerando que após a Investigação Detalhada realizada em 2011, a qual não foi totalmente aprovada pela CETESB, não foram realizadas novas investigações no contexto do GAC. Para as análises realizadas no presente estudo, considerou-se a necessidade do refinamento das informações já obtidas por meio das avaliações e investigações realizadas no antigo lixão, no contexto do GAC e fora dele, bem como foram consideradas as lacunas de informações identificadas, para as quais foram recomendadas ações visando a obtenção de um modelo conceitual completo e com incertezas reduzidas.

O cenário apresentado das condições pretéritas e recentes do antigo lixão Santa Madalena, para o qual todos os estudos constataram a contaminação dos recursos naturais locais, entende-se que o conhecimento e a caracterização do meio físico sejam de grande importância para a obtenção das propriedades físicas dos diferentes compartimentos ambientais que regem o comportamento do lixiviado e das águas subterrâneas no meio e, conseqüentemente, determinam o transporte dos contaminantes presentes no maciço.

Conforme verificado por 3 dos autores considerados (ÁLVARES, 2000; VELOZO, 2006 e SHINZATO, 2014), o perfil litoestratigráfico local apresentou camadas com teor silteoso e argiloso que possuem espessuras que variam de décímetro a metros. Apesar de a granulometria local apontar maiores porcentagens de areia e de ter sido verificado um valor de condutividade hidráulica que aponta para a presença predominante de sedimentos arenosos, não é recomendada a generalização da litologia em maior escala, uma vez que o meio físico apresenta, intrinsecamente, heterogeneidades que devem ser consideradas na caracterização do meio, em decorrência da sua importância para a determinação das zonas de fluxo, de transporte e de armazenamento de contaminantes.

Nesse sentido, conforme abordado anteriormente, o relatório de Investigação Detalhada apresentou resultados para o teste de condutividade hidráulica, o qual foi realizado somente em dois pontos de investigação, que foram generalizados para toda a área do lixão. Este mesmo cenário foi observado para as porosidades aparente e efetiva, cujos valores foram considerados para todo o meio físico local.

Sendo assim, recomenda-se que, para novas investigações no antigo Lixão Santa Madalena, sejam utilizadas ferramentas e metodologias de alta resolução, conhecidas como HRSC – *High Resolution Site Characterization*, as quais também são recomendadas pela CETESB (2017) para áreas contaminadas de alta complexidade. Dentre tais tecnologias, entende-se que a *Hydraulic Profiling Tool* (HPT) e o *Pneumatic Slug Test* (PST) possam ser utilizadas na determinação dos diferentes valores de condutividade hidráulica encontrados para diferentes composições granulométricas em profundidade. Tais métodos de alta resolução proporcionam resultados relacionados com os perfis estratigráficos em tempo real, aferindo as propriedades hidráulicas do solo. Além disso, por exemplo, a HPT revela dados relativos à pressão hidrostática, ao perfil piezométrico e à profundidade do lençol freático, sendo que este último dado é significativamente importante na determinação do fluxo das águas subterrâneas.

Cabe mencionar que, apesar dos altos custos das metodologias mais atuais e robustas e, comprovadamente, mais eficazes na determinação das características do meio físico e dos contaminantes, a investigação mais acurada do comportamento da contaminação reflete resultados que subsidiam a tomada de decisão em relação à área contaminada, reduzindo custos em etapas de gerenciamento posteriores. Riyis et al. (2013) afirmam que, havendo uma estimativa com menor incerteza da massa e da localização dos contaminantes, por meio da melhor identificação e delimitação da contaminação e das interações entre o meio e os contaminantes, é possível diminuir os custos e aumentar o desempenho da etapa de remediação.

Complementarmente, um estudo de caso realizado por Riyis et al. (2015) mostrou que, a partir da utilização de ferramentas de investigação de alta resolução, bem como a partir de análises químicas de diversas amostras de solo em um mesmo ponto de amostragem, foram obtidas informações em detalhe relativas ao meio físico e às concentrações de contaminantes, as quais promoveram a estimativa da massa total do contaminante investigado. O referido autor demonstrou que a abordagem tradicional, como vem sendo realizada há anos, proporcionou em seu estudo uma massa de contaminantes 41% maior que a massa determinada por meio de

tecnologias de alta resolução, justificando sua preferência ao uso de metodologias mais precisas.

Portanto, verifica-se que a utilização das referidas metodologias de investigação proporciona dados detalhados relativos à área objeto de estudo, podendo ser utilizadas tanto para a caracterização do meio físico, quanto para a caracterização dos contaminantes, resultando em informações tais como a distribuição e a interação desses com o meio físico e a massa dos compostos presentes nos diferentes compartimentos ambientais.

Tais características, conforme visto anteriormente, não foram contempladas na investigação detalhada realizada no contexto do GAC, em 2011, configurando uma lacuna de informações que são essenciais para o avanço dos processos de gerenciamento de áreas contaminadas. Sendo assim, recomenda-se a utilização abrangente das metodologias de alta resolução, as quais devem ser selecionadas em conformidade com as condições técnicas e financeiras da investigação, considerando-se a importância de verificar as condições atuais da área com o detalhamento necessário, para que as medidas de intervenção e/ou remediação sejam assertivas e evitem futuros gastos adicionais.

No que tange ao fluxo das águas subterrâneas, o qual também pode ser obtido por meio das tecnologias de alta resolução, entende-se que a direção noroeste pode ser considerada em futuras investigações, cabendo a essas a elaboração de mapas potenciométricos representativos, que considerem os diferentes períodos sazonais, visando o atendimento às exigências da DD 038.

Também é recomendada a investigação da área contaminada, no que tange à distribuição dos contaminantes no meio, em extensões superiores ao que determina a CETESB (2017). Conforme apresentado anteriormente, no artigo elaborado por Morita et al. (2021), foram mencionados estudos que afirmam que as plumas de contaminação podem não exceder 1 km de extensão, enquanto outros trabalhos apontam que tais plumas podem atingir distâncias maiores que 5 km (CHRISTENSEN et al., 2000; CHAKRABORTY et al., 2016; RANA et al., 2017).

A partir de tais constatações, verifica-se a necessidade de investigar regiões do entorno do antigo lixão que abranjam extensões significativas, a fim de delimitar as plumas de contaminantes e verificar o alcance da contaminação, especialmente em áreas com uso residencial. Neste sentido, o presente trabalho verificou, por meio de imagens orbitais e das

ferramentas disponibilizadas pelo *software Google Earth Pro*, que em uma região delimitada de 3.000m a partir dos limites da área objeto de estudo, existem bairros residenciais, tal como o Recreio Campestre, o qual se distancia do antigo lixão em, aproximadamente, 2.000m, a noroeste e oeste. Além disso, dados disponibilizados pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) revelaram a existência de, respectivamente, 34 e 47 poços de captação de água subterrânea no entorno do antigo lixão, em uma distância máxima de 3.000m.

Sendo assim, a partir da constatação da existência de poços de captação de água subterrânea, localizados principalmente em bairros residenciais do entorno do antigo lixão, entende-se que é importante que as investigações a serem realizadas no maciço de resíduos e em seu entorno abranjam extensões maiores que 500 metros, sendo recomendada a distância de 3.000m a partir dos limites da área do lixão. Adicionalmente, recomenda-se a amostragem e análise das águas dos referidos poços de captação, a fim de determinar sua qualidade e verificar se há influência do antigo lixão nessas águas que são predominantemente captadas para o consumo humano.

No que diz respeito à aplicação dos métodos geofísicos e seus resultados, entende-se que estes são importantes, especialmente no que tange à análise histórica da contaminação e sua atenuação ao longo do tempo, sendo recomendada a continuidade da utilização de tais métodos. Recomenda-se que os ensaios geofísicos sejam abrangentes em extensão, contemplando principalmente as regiões localizadas à jusante do maciço, com investigações de caráter vertical e horizontal, em conformidade com a viabilidade técnica e financeira do estudo a ser desenvolvido na área.

Conforme abordado neste estudo, a partir dos ensaios geofísicos, foram determinadas as localizações dos pontos de investigação, nos quais foram instalados poços de monitoramento, a fim de verificar a presença ou a ausência de contaminantes no solo e nas águas subterrâneas. Entretanto, somente alguns dos estudos que utilizaram poços de monitoramento para a investigação da área descreveram com clareza o processo de escolha da localização de tais pontos, sendo que a maioria também não apresentou seus perfis construtivos. Entende-se que tal constatação configura uma lacuna de informações que são fundamentais para a determinação da validade dos resultados obtidos nas amostragens e em ensaios de condutividade.

É recomendável que os próximos estudos a serem desenvolvidos na área do antigo lixão utilizem somente os poços que possuem informações sobre seu perfil construtivo e que estejam em conformidade com a norma NBR ABNT 13.895:2007 – Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem – Procedimento. Além disso, recomenda-se a instalação de novos poços de monitoramento e que a escolha de suas localizações seja estratégica, possibilitando a delimitação das plumas de contaminação, em detrimento da instalação de poços de monitoramento situados somente nos *hot spots* que proporcionam somente a verificação das maiores concentrações de contaminantes, mas não o conhecimento dos limites das plumas de contaminação.

Complementarmente, a fim de obter localizações assertivas para a instalação de poços de monitoramento ou para a aplicação criteriosa dos demais métodos de investigação, além da utilização de métodos geofísicos abrangentes em extensão, entende-se necessária a realização de métodos de *screening* na área do antigo lixão. Tais métodos proporcionam resultados que determinam qualitativa e/ou quantitativamente os compostos contaminantes presentes no meio, geralmente de maneira mais rápida e menos custosa. Como exemplo, pode-se citar a coleta de água subterrânea por meio da técnica *Grab Sampling*, a qual possibilita a amostragem das águas subsuperficiais sem a necessidade da instalação de poços de monitoramento. A técnica é amplamente difundida na investigação de áreas contaminadas e é caracterizada por demandar baixos investimentos, na medida em que proporciona resultados capazes de nortear a escolha dos locais a serem profundamente investigados.

Sendo assim, as técnicas de *screening*, exemplificadas pelo *Grab Sampling*, além de sinalizar os locais onde ocorrem maiores concentrações de contaminantes, em suas diferentes fases, podem apontar os principais tipos de compostos e/ou elementos presentes no meio, isto é, metais, compostos orgânicos voláteis ou semivoláteis, hidrocarbonetos totais de petróleo, pesticidas, contaminantes emergentes, entre outros, norteados também a escolha das SQIs que devem ser investigadas.

Neste sentido, no que tange aos tipos de contaminantes presentes no solo e nas águas subterrâneas, especificamente nos lixões, Morita et al. (2021) verificaram que os lixões situados no Brasil, que foram alvo de estudos e investigações ambientais, são comumente investigados para os mesmos tipos de contaminantes, predominantemente para os metais. Conforme apresentado anteriormente, os autores do estudo constataram que os principais contaminantes encontrados no solo dos lixões são Ba, Cd, Cu, Hg, Cr, Pb e Fe, enquanto os principais

elementos verificados nas águas subterrâneas são Ba, Hg, Pb, Fe e Mn, além de valores significativos de P, DBO, OD e de coliformes.

Entretanto, apesar das constatações de Morita et al. (2021), entende-se necessária a verificação da existência de outros tipos de compostos contaminantes em lixões, tal como o antigo lixão Santa Madalena, uma vez que a origem dos resíduos depositados pode não ser inteiramente conhecida, fato que acarreta o desconhecimento dos contaminantes que possivelmente contaminam o meio. Tal cenário já havia sido sinalizado por Morita & Wendland (2019b), que mencionaram a possibilidade da existência de outros compostos normalmente não analisados em campanhas de monitoramento, tais como os contaminantes emergentes, amplamente encontrados em aterros, os quais podem proporcionar riscos à saúde pública e aos ecossistemas.

Sendo assim, recomenda-se a utilização de técnicas de *screening* para a obtenção de resultados que auxiliem as tomadas de decisões para uma investigação ambiental direcionada, no que tange à localização dos pontos investigativos e às análises químicas a serem realizadas. Entende-se que essa etapa inicial é fundamental para a verificação dos tipos de contaminantes presentes no meio, cujas análises devem abranger uma ampla gama de compostos e/ou elementos que podem causar risco à saúde humana e ao meio ambiente.

Complementarmente, considerando-se que os estudos da área contaminada não devem ser limitados, foi verificado, ao longo deste estudo, que as águas superficiais também são prejudicadas, em termos de qualidade ambiental, pela existência do antigo lixão Santa Madalena, em conformidade com os estudos de Resende et al. (2014) e Morita et al. (2021). Resende et al. (2014) concluíram que as alterações verificadas estão associadas à influência do antigo lixão, contudo, os resultados apontaram a possibilidade da existência de outras fontes de contaminação, tal como o lançamento de efluentes, que possivelmente estejam alocadas à montante dos pontos de investigação.

Álvares (2000) também sugeriu que as concentrações de determinados elementos verificados acima dos padrões de potabilidade encontrados nas águas superficiais e subterrâneas podem estar associadas à condução inadequada das amostragens, bem como à natureza dos compartimentos ambientais ou às outras atividades desenvolvidas localmente, como a agropecuária. Além disso, Morita et al. (2021), em seu estudo, verificaram que os elementos

Ba, Fe e Pb possivelmente são originados de depósitos de resíduos, contudo, afirmam que tais elementos podem ter origem em outras fontes de contaminação.

A partir da hipótese da existência de fontes de contaminação alternativas, entende-se que a caracterização ambiental do entorno e o levantamento de seu uso e ocupação são importantes para o conhecimento de possíveis fontes de contaminação que possam alterar a qualidade das matrizes ambientais da região. Além disso, é recomendável a realização de amostragem de *background*, tanto das águas superficiais, quanto das águas subterrâneas, a partir da determinação dos fluxos superficiais e, principalmente, subterrâneos, a fim de obter o conhecimento das concentrações naturais do solo e das águas, o que possibilita a comparação entre os resultados obtidos no interior e à jusante do lixão e os valores verificados naturalmente nas matrizes ambientais locais.

Apesar de Resende et al. (2014) não terem realizado amostragem de *background* em seu estudo realizado no Córrego São José, os resultados obtidos apontaram a alteração da qualidade das águas superficiais e da ictiofauna do referido córrego, apontando também a influência do antigo lixão. Cabe mencionar que Morita (2020) também comprovou, por meio de testes ecotoxicológicos, que a água superficial é tóxica para os microrganismos utilizados em seu estudo, além de ter constatado 100% de mortalidade dos microrganismos quando utilizado o lixiviado. Tais estudos devem ser tomados como incentivo à continuidade da investigação das águas superficiais, as quais frequentemente não são amostradas e também não são alvo de investigação da DD 038, apesar da importância dessa matriz para a qualidade do meio ambiente.

Além disso, os resultados obtidos por Resende et al. (2014) podem servir para a comparação da alteração da qualidade do córrego São José ao longo dos anos. Contudo, entende-se que, uma vez que as coletas e análises do referido estudo foram realizadas em 2007, não é recomendável a utilização de seus resultados como indicadores da qualidade ambiental atual para o planejamento de investigações futuras, sendo necessária a atualização dos dados por meio de novas amostragens.

Complementarmente, o estudo de Resende et al. (2014) difere no que tange ao alvo de investigação, quando comparado com os demais estudos levantados. O estudo da ictiofauna se enquadra nos estudos ecológicos, os quais são frequentemente negligenciados, uma vez que não são estabelecidos critérios claros e objetivos na Decisão de Diretoria 038/2017 (CETESB, 2017), no que tange à necessidade de análises ecológicas para a avaliação de risco ecológico.

A referida DD, em seu item 4.1.6.2, declara que “A avaliação de Risco Ecológico deverá ser elaborada nas situações em que exista ecossistema natural sob influência ou que possam estar sob influência de uma Área Contaminada sob Investigação (ACI) ”. Além disso, a CETESB (2017) explica que a avaliação de risco ecológico tem como objetivo verificar a ocorrência de risco para uma espécie, comunidade ou ecossistema, devendo a avaliação de risco ecológico conter no mínimo três linhas de evidências, sendo elas: química, ecotoxicológica e ecológica.

Sendo assim, verifica-se que a CETESB (2017), apesar de não determinar com clareza a matriz ambiental alvo de avaliação, determina a avaliação de risco ecológico nos casos em que a área contaminada possa gerar riscos aos ecossistemas naturais sob sua influência, como pode ser constatado no caso do antigo lixão Santa Madalena, o qual está inserido em uma Unidade de Conservação (UC) de Uso Sustentável, especificamente, na Área de Proteção Ambiental Corumbataí-Botucatu-Tejupá (APA Corumbataí). Ademais, pode-se constatar que somente uma das linhas de evidências solicitadas pela CETESB (2017) está amplamente contemplada pelos estudos levantados, incluindo a Investigação Detalhada, a qual corresponde à linha de evidência química. Não foram encontrados demais estudos, com exceção dos trabalhos realizados por Resende et al. (2014) e Morita (2020), que abordassem as linhas de evidência ecológica e ecotoxicológicas, fato que corresponde a uma lacuna das investigações ambientais do antigo lixão.

6. SUGESTÕES

- Realizar nova Investigação Detalhada e nova Avaliação de Risco à Saúde Humana, as quais devem ser conduzidas em conformidade com as exigências da Decisão de Diretoria 038/2017/C e do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (2021), a fim de elaborar um Modelo Conceitual representativo da área contaminada;
- Buscar parcerias entre os responsáveis legais da área contaminada, órgãos ambientais e universidades, a fim de investigar a área contaminada e monitorar continuamente a qualidade dos recursos ambientais afetados;
- Diagnosticar as condições atuais da área, com o detalhamento necessário para que as medidas de intervenção, de engenharia e/ou de remediação sejam assertivas e evitem futuros custos ambientais e financeiros adicionais;

- Construir um diagnóstico da área contaminada por meio da utilização de tecnologias de alta resolução, de métodos que proporcionem resultados detalhados e abordagens conservadoras, considerando as condições técnicas e financeiras da investigação;
- No âmbito da Investigação Detalhada, recomenda-se:
 - Considerar toda a extensão do maciço de resíduos para as investigações, com base na estimativa de Ellert *et al.* (1990), além de investigar o seu entorno em distâncias maiores que 500 metros;
 - Caracterizar o meio físico, considerando suas heterogeneidades e diferentes unidades hidroestratigráficas por meio de análises granulométricas e das tecnologias de alta resolução;
 - Obter dos dados hidrogeológicos, tais como condutividade hidráulica e porosidade, considerando sua variabilidade no espaço;
 - Destacar as unidades hidroestratigráficas de importância para o transporte e retenção dos contaminantes;
 - Identificar e caracterizar a contaminação, considerando sua distribuição, comportamento e interação com o meio físico;
 - Estimar a massa de contaminantes;
 - Caracterizar a fonte de contaminação, por meio de amostragem dos materiais do maciço e ensaios de solubilização em pontos de investigação espaçados ao longo da extensão do lixão e em diferentes profundidades, comparando os resultados com os obtidos por Shinzato (2014) e Morita & Wendland (2019);
 - Utilizar métodos geofísicos de maneira abrangente, para a escolha da localização dos pontos de investigação, tendo como base a extensão da contaminação verificada Morita (2020);
 - Instalar poços não só nas regiões com maior concentração de contaminantes, mas também nas adjacências dos *hot spots*, a fim de obter a delimitação da pluma de contaminantes;
 - Elaborar mapas potenciométricos representativos, considerando os diferentes períodos sazonais e tendo como base o fluxo preferencial para a direção noroeste, conforme observado por Gonçalves (1992), Álvares (2000), Velozo (2006) e PMSC (2011);

- Utilizar métodos de *screening* que proporcionem resultados que auxiliem a tomada de decisão no que tange à escolha dos pontos de investigação e a escolha das SQIs a serem investigadas, considerando a análise de uma ampla gama de compostos tais como VOC, SVOC, TPH, pesticidas, contaminantes emergentes, entre outros compostos que possam causar risco à saúde humana;
- Utilizar somente os poços de monitoramento pré-existentes que possuam perfil construtivo em conformidade com a norma NBR ABNT 13.895:2007 – Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem – Procedimento;
- Realizar a amostragem e análise das águas dos poços de captação situados nas zonas residenciais no entorno do lixão, para a determinação de sua qualidade e verificação da influência do maciço de resíduos;
- Investigar as águas superficiais adjacentes ao antigo lixão, comparando os resultados com os obtidos por Gadotti (1997), Álvares (2000) e Resende et al. (2014);
- Realizar amostragem de *background* para as águas superficiais e subterrâneas;
- Apresentar mapas, seções e modelos tridimensionais com os resultados obtidos na investigação detalhada;
 - No âmbito da Avaliação de Risco à Saúde Humana, recomenda-se:
- Contemplar todas as exigências da DD 038, determinando principalmente as unidades e os caminhos de exposição;
- Delimitar a área de risco, apresentando mapas com os riscos identificados, os receptores e a localização dos *hot spots* e apresentar de forma clara os critérios adotados para tal delimitação;
- Realizar a ARSH considerando todos os elementos/compostos químicos que apresentarem concentrações acima dos valores orientadores vigentes atualmente, de acordo com os diferentes períodos sazonais;
 - Realizar a Avaliação de Risco à Saúde Humana e a Avaliação de Risco Ecológico, considerando as linhas de evidência química, ecológica e ecotoxicológica;

- Verificar a necessidade da implementação de medidas de intervenção em âmbito institucional, bem como de medidas de engenharia e/ou remediação;

A seguir estão apresentadas as Tabelas 1 e 2, as quais resumem as exigências da DD 038, no que tange à Investigação Detalhada e à Avaliação de Risco à Saúde Humana, respectivamente, bem como indica quais dessas exigências foram contempladas pela ID e pela ARSH realizadas em 2010 e pelos estudos acadêmicos, apontando as principais sugestões para que os futuros estudos na área sob avaliação cumpram os requisitos da DD 038, para as referidas etapas do GAC.

Tabela 1: Resumo das exigências da DD 038 e sugestões para a Investigação Detalhada
(continua)

Exigências da DD038 para a ID	Investigação Detalhada			Estudos acadêmicos			Recomendações
	S	N	P	S	N	P	
a) Caracterização do meio físico com plantas, seções e modelos tridimensionais e especificação da porosidade para cada unidade hidroestratigráfica identificada			x			x	Caracterizar o meio físico, identificando as heterogeneidades e as diferentes unidades hidroestratigráficas por meio de tecnologias de alta resolução
b) Georreferenciamento das sondagens, pontos de amostragem e poços de monitoramento	x					x	Georreferenciar todos os futuros pontos de investigação por meio do levantamento planialtimétrico e apresentar as coordenadas no relatório
c) Apresentação dos perfis de sondagem, indicando as unidades hidroestratigráficas e suas espessuras, o NA, as medições em campo e a profundidade de amostragem	x				x		Considerar na apresentação dos perfis as heterogeneidades das unidades hidroestratigráficas e suas espessuras, o NA, as medições em campo e a profundidade de amostragem
d) Descrição dos procedimentos efetuados durante instalação de cada poço de monitoramento (perfuração, montagem e desenvolvimento)	x				x		Descrever detalhadamente os procedimentos a serem realizados na perfuração, na montagem e no desenvolvimento de poços de monitoramento
e) Apresentar perfil construtivo de cada poço de monitoramento com justificativa de seu posicionamento e da seção filtrante			x			x	Justificar a localização dos futuros poços de monitoramento a serem instalados com o auxílio de métodos geofísicos, considerando localizações que não só permitam identificar os <i>hot spots</i> , mas que também auxiliem na delimitação das plumas de contaminação
f) Apresentar tabela com profundidade do NA, características da fase livre, cota topográfica dos poços, carga e condutividade hidráulica para cada poço de monitoramento			x		x		Focar na obtenção da condutividade hidráulica dos diferentes pontos de investigação, considerando as heterogeneidades do meio físico, por meio de métodos de alta resolução
g) Documentação fotográfica relativa aos serviços de campo	x					x	Documentar com registros fotográficos as atividades desenvolvidas em campo
h) Texto explicativo com os resultados e interpretações dos métodos de investigação de alta resolução (quanto utilizados), com a apresentação dos resultados em planta e seções transversais e longitudinais		x			x		Utilizar de maneira abrangente os métodos de alta resolução a fim de caracterizar o meio físico e sua contaminação, apresentando os resultados obtidos conforme as exigências da CETESB
i) Texto explicativo com a interpretação dos ensaios destinados à caracterização das propriedades físicas do meio			x			x	Realizar a caracterização das propriedades físicas do meio considerando sua heterogeneidade e a extensão do antigo lixão e seu entorno, por meio de métodos de alta resolução que forneçam informações detalhadas
j) Explicação dos dados hidrogeológicos obtidos para todos os materiais identificados, destacando as unidades hidroestratigráficas de importância para o transporte e retenção dos contaminantes		x				x	Obter dados hidrogeológicos considerando o meio e suas heterogeneidades por meio de tecnologias de alta resolução que forneçam informações hidrogeológicas detalhadas e relacionar a existência de diferentes unidades hidroestratigráficas com o armazenamento e transporte dos contaminantes no meio

Tabela 1: Resumo das exigências da DD 038 e sugestões para a Investigação Detalhada
(continuação)

Exigências da DD038 para a ID	Investigação Detalhada			Estudos acadêmicos			Recomendações
	S	N	P	S	N	P	
k) Plantas e seções representando as superfícies de mesmo potencial hidráulico, horizontal e verticalmente, estabelecendo relações hidráulicas com os demais corpos hídricos			x			x	Focar na obtenção de mapas potenciométricos representativos e, especialmente, na determinação das superfícies verticais de mesmo potencial hidráulico
l) Especificar as SQIs e o critério empregado para a seleção das mesmas		x			x		Analisar uma ampla gama de contaminantes, tais como os compostos pertencentes aos grupos metais, VOC, SVOC, TPH, pesticidas, contaminantes emergentes, entre outros, por meio de técnicas de <i>screening</i> , tal como o <i>Grab Sampling</i> , a fim de identificar ou não a presença desses contaminantes no meio
m) Quantificação e caracterização das contaminações associadas as fontes primárias de contaminação, delimitando tridimensionalmente as plumas de contaminação e calculando as massas de SQIs nas diferentes unidades hidroestratigráficas identificadas			x		x		Delimitar as plumas de contaminantes tridimensionalmente por meio de poços estrategicamente posicionados e calcular a massa de contaminantes nas diferentes unidades hidroestratigráficas a serem identificadas por meio das tecnologias de alta resolução
n) Texto explicativo sobre a caracterização das contaminações, com plantas, seções e modelos tridimensionais, considerando as diferentes unidades hidroestratigráficas e meios que compõem o subsolo		x			x		Representar visualmente e tridimensionalmente a distribuição das SQIs presentes nas diferentes unidades hidroestratigráficas a serem identificadas por meio da instalação de poços multiníveis estrategicamente posicionados a partir dos resultados de ensaios geofísicos
o) Planta e seções com a localização e dimensionamento das fontes potenciais, primárias e secundárias da contaminação, com a representação da localização dos pontos de amostragem executados			x			x	Identificar a localização aproximada da fonte de contaminação, isto é, do maciço de resíduos, por meio de ensaios geofísicos e de sondagens de reconhecimento. Entende-se que o dimensionamento da fonte de contaminação não é estritamente necessário, sendo de maior importância a delimitação da contaminação
p) Texto com justificativa da escolha do posicionamento dos pontos de amostragem e das profundidades de investigação			x			x	Posicionar os pontos de investigação em conformidade com resultados de ensaios geofísicos atualizados, considerando a instalação de poços nos <i>hot spots</i> para reconhecimento das SQIs presentes e nas adjacências desses, a fim de delimitar a pluma de contaminação
q) Texto com descrição dos métodos de investigação e amostragem utilizados, justificando as escolhas realizadas	x					x	Embasar a escolha dos métodos de investigação e de amostragem na literatura existente, buscando a utilização de métodos conceituados que proporcionem informações detalhadas do meio físico e da contaminação, tais como as HRSC

Tabela 1: Resumo das exigências da DD 038 e sugestões para a Investigação Detalhada (conclusão)

Exigências da DD038 para a ID	Investigação Detalhada			Estudos acadêmicos			Recomendações
	S	N	P	S	N	P	
r) Texto e representações gráficas da distribuição das SQIs (tridimensionalmente) modelada para o tempo em que será atingida a concentração máxima onde estão localizados os receptores identificados, quanto aplicável		x			x		Utilizar a modelagem matemática para a análise do comportamento das plumas de contaminantes no meio ao longo do tempo. Destaca-se que tal exigência está atrelada às informações obtidas por meio da análise de risco. Sendo assim, entende-se que a Investigação Detalhada deve ocorrer em conjunto com a ARSH
s) Laudos analíticos, ficha de recebimento de amostras emitidas pelo laboratório e as cadeias de custódia devidamente assinadas pelo profissional responsável pelas análises	x				NA		Anexar ao relatório final os documentos pertinentes às amostragens e análises da matrizes ambientais coletadas
t) Texto e ilustração com a atualização do MCA 3 e suas limitações e recomendações de ações a serem realizadas em vista dos resultados obtidos		x			NA		Apresentar o Modelo Conceitual da Área 3 atualizado a partir dos resultados a serem obtidos e recomendar ações com base nos levantamentos realizados
u) Identificação de todos os responsáveis legais e do responsável técnico, especificando os respectivos e-mails e endereços completos			x		NA		Apresentar as informações pertinentes relativas aos responsáveis legal e técnico
v) Declaração de responsabilidade devidamente assinada pelos responsáveis legal e técnico	x				NA		Apresentar a declaração de responsabilidade devidamente assinada pelos responsáveis legal e técnico

Legenda: S (sim), N (não), P (parcialmente) e NA (não se aplica)

Fonte: autoral.

Tabela 2: Resumo das exigências da DD 038 e sugestões para a Avaliação de Risco à Saúde Humana (continua)

Exigências da DD038 para a ARSH	ARSH			Estudos acadêmicos			Recomendações
	S	N	P	S	N	P	
a) Identificar as unidades de exposição		x			x		Identificar as unidades de exposição onde estão situados os receptores expostos ou potencialmente expostos, considerando os caminhos de exposição, a partir da caracterização física do meio a ser realizada na ID, e as SQIs presentes também determinadas e delimitadas na ID
b) Identificar os receptores humanos em cada unidade de exposição, bem como os receptores que possam vir a ser atingidos em decorrência da expansão das plumas de contaminação			x		x		Identificar inicialmente as unidades de exposição e identificar principalmente os receptores que possam ser futuramente atingidos, considerando a expansão das plumas de contaminantes ao longo do tempo, para a qual é recomendada a utilização de modelagem matemática em conjunto com a Investigação Detalhada

Tabela 2: Resumo das exigências da DD 038 e sugestões para a Avaliação de Risco à Saúde Humana (continuação)

Exigências da DD038 para a ARSH	ARSH			Estudos acadêmicos			Recomendações
	S	N	P	S	N	P	
c) Identificar as SQIs em cada unidade de exposição		x			x		Identificar inicialmente as unidades de exposição e posteriormente analisar o alcance das SQIs (determinadas e delimitadas na ID) em tais unidades, apresentando visualmente os resultados por meio mapas, seções e modelos tridimensionais
d) Identificar todos os caminhos de exposição presentes e potenciais, atuais e futuros, em cada unidade de exposição		x			x		Determinar os percursos desenvolvidos ou que possam ser desenvolvidos pelas SQIs presentes desde a fonte de contaminação até o receptor, por meio da caracterização das diferentes unidades hidroestratigráficas a ser realizada na Investigação Detalhada
e) Calcular o risco para cada substância química de interesse considerando os diferentes receptores e caminhos de exposição para cada unidade de exposição					x		Calcular o risco para todas as SQIs identificadas em todos os períodos sazonais, considerando os diferentes receptores e os caminhos e unidades de exposição que também devem ser identificados nesta etapa
f) Calcular o risco total para cada unidade de exposição, por receptor, considerando a soma dos riscos individuais de cada SQI, agrupando-as em função dos seus efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos					x		Calcular novamente o risco total, considerando as exigências da CETESB, para as SQIs a serem identificadas e investigadas na etapa de Investigação Detalhada
g) Calcular as CMAs para as SQIs existentes, para cada meio, considerando cada caminho de exposição e receptor identificado					x		Calcular novamente as CMAs das SQIs a serem identificadas na etapa de Investigação Detalhada, considerando os caminhos de exposição a serem detalhados e os receptores a serem identificados
h) Apresentar mapas de risco com a indicação dos receptores e dos hot spots					x		Elaborar mapa representativo dos riscos a serem calculados para as SQIs identificadas na nova ID e apresentar em conjunto as plumas de contaminação e as regiões com maiores concentrações de contaminantes que também devem ser delimitadas na ID
i) Apresentar conclusão sobre a necessidade de implementação de medidas de intervenção	x					x	Propor as medidas de intervenção consideradas necessárias com embasamento suficiente a ser adquirido durante as etapas de investigação detalhada e avaliação de risco à saúde humana, justificando as medidas selecionadas e seu alcance espacial e temporal

Legenda: S (sim), N (não), P (parcialmente) e NA (não se aplica)

Fonte: autoral.

7. CONCLUSÕES

Para que uma investigação ambiental consistente seja desenvolvida, especialmente no âmbito do Gerenciamento de Áreas Contaminadas, é importante o conhecimento das informações pré-existentes relativas ao objeto de estudo, as quais podem fornecer diretrizes e nortear as futuras investigações a serem realizadas, evitando que estas sejam repetitivas e/ou selecionem métodos, tecnologias e abordagens inadequados.

Neste contexto, o presente trabalho de graduação buscou a obtenção de um panorama dos dados e informações disponíveis, relativos ao antigo e desativado Lixão Santa Madalena, visando a constatação de possíveis lacunas de informações necessárias ao procedimento do GAC e a verificação daquelas que podem ser consideradas e incorporadas na continuidade das investigações ambientais na área objeto de estudo.

Para tal, foram analisados os diversos estudos acadêmicos desenvolvidos no antigo lixão, bem como o relatório final elaborado no contexto no GAC, o qual apresenta os resultados obtidos na Investigação Detalhada e da Avaliação de Risco à Saúde Humana conduzidas preteritamente na área em questão. Ademais, foram estudados os principais aspectos e diretrizes legais do GAC aplicados no estado de São Paulo, o que possibilitou a análise comparativa entre suas exigências e as informações existentes nos referidos estudos.

Os resultados alcançados neste trabalho apontam as diversas lacunas que existem nos estudos considerados, especialmente na ID e na ARSH, no que tange aos requisitos da CETESB constantes na DD 038. Verificou-se que a maior parte dos requisitos da investigação detalhada e da avaliação de risco à saúde humana não foram contemplados ou foram desenvolvidos de maneira insatisfatória, acarretando inconsistências para o modelo conceitual da área, o qual, por sua vez, não foi apresentado nos estudos relativos ao GAC. A partir disso, constatou-se que a ID e ARSH proporcionaram resultados que inviabilizam a tomada de decisão quanto ao futuro da área contaminada, devido às diversas incertezas que permaneceram após tais estudos.

Os trabalhos acadêmicos analisados, por sua vez, apresentaram resultados que podem nortear futuras investigações na área objeto de estudo, uma vez que estes se aproximam das exigências da DD 038, apesar de não considerarem os critérios técnicos para a investigação de uma área contaminada. Além disso, tais estudos revelam dados e informações que indicam a necessidade da continuidade das investigações no maciço de resíduos, uma vez que todos constataram a contaminação do meio, mesmo após 25 anos de seu encerramento.

A partir do levantamento, análise e consolidação das informações existentes relativas ao antigo lixão, foi possível elaborar sugestões, em conformidade com os objetivos estabelecidos para o presente trabalho de graduação. Visando o incentivo à continuidade das investigações no antigo lixão, no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas, recomenda-se, a curto prazo, a realização de uma nova ID e de uma nova ARSH, as quais devem ser conduzidas em conformidade com as exigências da Decisão de Diretoria 038/2017/C e do Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (2021), considerando também as sugestões específicas proporcionadas pelo presente trabalho para cada uma das etapas.

Tal recomendação visa a elaboração de um Modelo Conceitual representativo da área contaminada, uma vez que o diagnóstico detalhado das condições atuais da área objeto de estudo é imprescindível para que as medidas de intervenção em âmbito institucional, de engenharia e/ou de remediação sejam assertivas e evitem futuros custos ambientais e financeiros adicionais.

Por fim, recomenda-se a busca por parcerias entre os responsáveis legais da área contaminada, órgãos ambientais e universidades, a fim de investigar e monitorar continuamente a qualidade dos recursos ambientais afetados, não só no antigo lixão Santa Madalena, mas nos lixões e aterros controlados espalhados em todo o território nacional.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: Porta Romana Studio, 2020. 52 p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 25 maio 2022.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: Porta Romana Studio, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 25 maio 2022.

ABRELPE & ISWA. **Roteiro para Encerramento de Lixões**. São Paulo, 2016. 36 p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/roteiro-para-encerramento-de-lixoes/>. Acesso em: 25 maio 2022.

ABRELPE & ISWA. **Saúde Desperdiçada**. São Paulo, 2015. 43p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/saude-desperdicada-o-caso-dos-lixoes>>. Acesso em: 25 maio 2022.

ALBERTO, Marcio Costa. **Heterogeneidades geológicas e o gerenciamento de áreas contaminadas em local situado na Interface da Serra do Mar com a Planície Aluvionar do Rio Cubatão (Cubatão/SP)**. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102941>. Acesso em: 27 maio 2022.

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. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-16072018-161604/pt-br.php>>. Acesso em 27 maio 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. NBR 15495-1: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

BRASIL, Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981 Política Nacional do Meio Ambiente, **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 31 ago. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm> Acesso em 25 maio 2022.

_____. Lei nº 9.605, de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, 12 fev. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm. Acesso em: 27 maio 2022.

_____. Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm/. Acesso em 25 maio 2022

_____. Lei N° 14.026 de 15 de julho de 2020 - **Novo marco do Saneamento (PNRS)**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em 25 maio 2022

_____. **Programa Nacional de Recuperação de Áreas Contaminadas**. Brasília, 2020. 40 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/recuperacao-de-areas-contaminadas>. Acesso em 25 maio 2022

_____. Portaria GM/MS nº 888, de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 4 maio 2021.

CETESB. **Manual para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Convênio CETESB/GTZ, 1999/2001.

_____. **Decisão de Diretoria nº 195/2005 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 Orientadores de 2001, e dá outras providências.

_____. **Decisão de Diretoria nº 038/2017/C de 7 de fevereiro de 2017**. Dispõe sobre a aprovação do “Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas”, da revisão do “Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas” e estabelece “Diretrizes para Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental”, em função da publicação da Lei Estadual nº 13.577/2009 e seu Regulamento, aprovado por meio do Decreto nº 59.263/2013, e dá outras providências. São Paulo: CETESB, 2017

_____. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/introducao-ao-gerenciamento-de-areas-contaminadas/conceituacao/>. Acesso em: 25 maio. 2022.

_____. **O que são áreas contaminadas**. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/o-que-sao-areas-contaminadas/#:~:text=Uma%20C3%A1rea%20contaminada%20pode%20ser,acidental%20ou%20at%20C3%A9%20mesmo%20natural>. Acesso em: 27 maio 2022.

_____. Lista de áreas contaminadas. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacao-de-areas-contaminadas/>. Acesso em: 25 maio 2022.

CHAKRABORTY, S., & KUMAR, R.N. Assessment of groundwater quality at a MSW landfill site using standard and AHP based water quality index: a case study from Ranchi, Jharkhand, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 188, n. 6, 2016

CHRISTENSEN, T.H.; BJERG, P.L.; KJELDSEN, P. Natural Attenuation: A Feasible Approach to Remediation of Ground Water Pollution at Landfills? *Groundwater monitoring and remediation*, 2000.

CÔRTEZ, Pedro Luiz; ALVES FILHO, Ailton Pinto; RUIZ, Mauro Silva; TEIXEIRA, Cláudia Echevengúá. A Deposição de Resíduos Industriais Organoclorados no Litoral do Estado de São Paulo: um estudo de caso. **Review Of Administration And Innovation** - Rai, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 132-163, 31 ago. 2011. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade. <http://dx.doi.org/10.5773/rai.v8i2.700>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1809203916304107>. Acesso em: 27 maio 2022.

EPA. **High-Resolution Site Characterization (HRSC)**. Disponível em: <https://clu-in.org/characterization/technologies/hrsc/>. Acesso em: 27 maio 2022.

ELIS, V.E. & ZUQUETTE, L.V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbano. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 1, p. 119-134, 2002.

ELLERT, N.; GREENHOUSE, J.; WILLIAMS, M.M.; MENDES, J.M.B.; HASSUDA, S. (1986). A geofísica aplicada na identificação da poluição do subsolo por depósitos de rejeitos urbanos e industriais. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 4. 1986, Brasília. **Anais...** Brasília: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. p. 528-531.

ELLERT, N.; ROSS, S.; MENDES, J. M. B.; MARTIN, E. (1990). **Mapeamento Geofísico do Lixão de São Carlos**. Águas Subterrâneas. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24446>. Acesso em 27 maio 2022

FERRAZ F.M., MIYASHIRO N.J., RIYIS M.T., CUNHA R.C.A. 2015. Estudo da condutividade hidráulica obtida em ensaios de campo: infiltração em sondagens e slugtest em poços de monitoramento. **InterfacEHS, Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, 10(1).

FERREIRA, João Alberto; ANJOS, Luiz Antônio dos. Aspectos de saúde coletiva e ocupacional associados à gestão dos resíduos sólidos municipais. **Cadernos de Saúde Pública**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 689-696, jun. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-311x2001000300023>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/zL8TvrTtCdmftbsmWjcKGCm/?lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2022.

FIORI, Joyce Pinheiro de Oliveira. **Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados**. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/6559/1/2010_JoycePinheirodeOliveiraFiori.pdf. Acesso em: 27 maio 2022.

FREITAS, A. L. S. (1996). **Caracterização do Aquífero Botucatu na Região do Lixão de São Carlos - SP** - Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

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. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-26082016-140416/pt-br.php>. Acesso em 27 maio 2022

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.; BOSSOLAN, N.R.S.; ORLANDO, M.J.G. (1992) Determinação da direção do fluxo defreativo no aterro sanitário de São Carlos. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 7. 1992, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1503-1510, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-81232012000600014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/y5kTpqkqyY9Dq8VhGs7NWwG/?lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2020

IPT. Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Guia de planos de intervenção para o Gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: BNDES, 2014. 398 p. Disponível em: https://www.ipt.br/institucional/campanhas/48-guia_para_gestao_de_areas_contaminadas.htm. Acesso em: 27 maio 2022.

JACOBI, Pedro Roberto; BESEN, Gina Rizpah. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**. Estudos Avançados, [S.L.], v. 25, n. 71, p. 135-158, abr. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142011000100010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/YgnDNBqW633Y8nfLF5pqLxc/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2022.

KAZA, S. et al. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, Dc: World Bank Group, 2018.doi:10.1596/978-1-4648 -1329-0. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO

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

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.

MORITA, Alice Kimie; WENDLAND, Edson Cesar. Caracterização dos resíduos sólidos e do lixiviado produzido por antigo depósito de resíduos. **Simpósio Sobre Resíduos Sólidos**, São Carlos, p. 1-7, 2019a. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Alice-Morita/publication/335798135_Caracterizacao_dos_residuos_solidos_e_do_lixiviado_produzido_por_antigo_deposito_de_residuos/links/5d7bea2f4585155f1e4c1641/Caracterizacao-dos-residuos-solidos-e-do-lixiviado-produzido-por-antigo-deposito-de-residuos.pdf. Acesso em: 27 maio 2022.

_____. Caracterização Hidrogeoquímica de área impactada por depósito de resíduos desativado em zona de recarga do aquífero Guarani. **Revista Geociências**, São Carlos, v. 38, n. 4, p. 1017-1028, 2019b. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/13742/11554>. Acesso em: 27 maio 2022.

_____. **Efeitos de impermeabilização superficial na mobilização de contaminantes e na comunidade microbiana em depósito de resíduos sólidos urbanos desativados**. 2020. 297 f. Tese (Doutorado) - Curso de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-21062021-152619/pt-br.php>. Acesso em: 27 maio 2022.

MORITA, Alice; BIANCO, Carolina; ANACHE, Jamil; COUTINHO, Jaqueline; PELINSON, Natalia; NÓBREGA, Juliana; ROSALEM, Lívia; LEITE, Camila; NIVIADONSKI, Leonardo; MANASTELLA, Caroline; WENDLAND, Edson. (2021). **Environmental Threat by Dumpsites and Non-Sanitary Landfills in Brazil**. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/355837784_ENVIRONMENTAL_THREAT_BY_DUMPSITES_AND_NON-SANITARY_LANDFILLS_IN_BRAZIL Acesso em 27 maio 2022

MUKHERJEE, S., Mukhopadhyay, S., Hashim, M.A., Gupta, B. Sen, 2014. Contemporary environmental issues of landfill leachate: Assessment and remedies. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.** 472–590. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.876524>

OTERO M.E., ABREU A.E.S. 2016. **Determinação da condutividade hidráulica com tecnologias DirectPush: vantagens e desvantagens** Terræ, 13(1-2):31-38. Disponível em: <<https://www.ige.unicamp.br/terrae/V13/PDFv13/TE072-4.pdf> >. Acesso em 27 maio 2022

PEJON, Osni Jose. Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba - SP (escala 1:100.000). 1992. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992

PARADIS D., TREMBLAY L., LEFEBVRE R., GLOAGUEN E., RIVERA A., PARENT M., BALLARD J.M., MICHAUD Y., BRUNET P. 2014. Field characterization and data integration to define the hydraulic heterogeneity of a shallow granular aquifer at a sub-watershed scale. **Environ.Earth Sci.**, 72(5):1325-1348.

PMSC - Prefeitura Municipal de São Carlos. **Investigação Ambiental Detalhada (Relatório Final)**. Coordenadoria Municipal de Meio Ambiente, São Carlos, 2011. 390p.

RANA, R.; GANGULY, R.; GUPTA, A.K. Indexing method for assessment of pollution potential of leachate from non- engineered landfill sites and its effect on ground water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 190, n. 1, 2017.

RIYIS, Marcos Tanaka. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução**. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2012.

RIYIS, Marcos Tanaka; GIACHETI, Luiz Heraldo; DERRITE, Rafael Muraro; RIYIS, Mauro Tanaka. Comparação entre ferramentas de amostragem de solo “DirectPush” em investigações geoambientais de áreas contaminadas. **III Congresso Internacional do Meio Ambiente Subterrâneo**. São Paulo. 2013b. Disponível em <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27487/17758>. Acesso em 27 maio 2022

RIYIS, Marcos Tanaka; GIACHET, Heraldo Luis; DERRITE, Rafael Muraro. Estimativa da Massa de Contaminantes Comparando Técnicas Tradicionais com Ferramentas de Investigação de Alta Resolução (HRSC). **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, São Paulo, v. 5, p. 38-49, 2015.

RIYIS, Marcos Tanaka; DERRITE, Rafael Muraro; HIRAI, Edegar Yoshio; LIMA, Elias Manoel de Brito; CEOLIN, Julia do Amaral; JESUS, Lucas Scarpant de. Avaliação das falhas no modelo conceitual de uma área contaminada utilizando investigação com métodos convencionais. **Interfaceehs - Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, São Paulo**, v. 12, p. 82-101, jun. 2017. Disponível em: http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2017/06/7-200_InterfacEHS_ArtigoRevisado.pdf. Acesso em: 27 maio 2022.

RESENDE, Juliana Cristina de; SANTANA, Jaqueline Santos; MARCIANO, Fernanda Teixeira e; ESPÍNDOLA, Evaldo Luiz Gaeta. Qualidade da Água e Ictiofauna do Córrego São José, São Carlos (SP): ênfase nos impactos gerados por lixão desativado. **Ciência e Natura**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 287-300, 12 set. 2014. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x13170>. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4675/467546174003.pdf>. Acesso em: 27 maio 2022.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº59.263**, de 5 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.

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.

SCHEFFER, E. C. M. **Gerenciamento de áreas contaminadas: uma breve análise dos princípios ambientais conformadores e seus aspectos práticos**. www.lume.ufrgs.br, 2017. - Acesso em 25/05/2022

SHINZATO, Marjolly Priscilla Bais. **Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de lixão desativado**. 2014. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-27012015-085018/en.php>. Acesso em: 27 maio 2022.

VELLOSO, Marta Pimenta. **Os restos na história: percepções sobre resíduos**. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 1953-1964, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-81232008000600031>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/csc/a/RZCMgZVGdW4y5wF7xHKYPcF/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2022.

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. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-27092006-155342/en.php>>. Acesso em: 27 maio 2022.

WILSON, David C. Development drivers for waste management. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 198-207, jun. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x07079149>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X07079149>. Acesso em: 25 maio 2022.

YOSHIKAWA, Nestor Kenji; FREITAS, Leandro Gomes de. Áreas contaminadas nos grandes centros urbanos: atuação do IPT. **Municípios de São Paulo: a revista da Associação Paulista de Municípios**, v.7, n.56, p.51-54, 2014.

ZUQUETTE, Lázaro Valentim. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras. 1987. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987

ANEXOS**Anexo I - Ficha de Cadastro do Lixão Santa Madalena na Lista CETESB (2020)**

Áreas Cadastradas no Estado de São Paulo

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS (LIXÃO FAZ. SANTA MADALENA)

FAZENDA SANTA MADALENA S/N - ZONA RURAL - SÃO CARLOS

Atividade indústria comércio posto de combustível resíduo acidentes agricultura desconhecida

Coordenadas (m): fuso 23 DATUM SAD69 UTM_E 210.124,00 UTM_N 7.555.164,00

Classificação contaminada com risco confirmado (ACRi)

reutilização

Etapas do gerenciamento

avaliação da ocorrência

medidas para eliminação de vazamento

investigação confirmatória

investigação detalhada e plano de intervenção

remediação com monitoramento da eficiência e eficácia

monitoramento para encerramento

avaliação preliminar

investigação confirmatória

investigação detalhada

avaliação de risco

plano de intervenção

projeto de remediação

remediação com monitoramento da eficiência e eficácia

monitoramento para encerramento

Fonte de contaminação

armazenagem produção manutenção emissões atmosféricas tratamento de efluentes

descarte disposição infiltração acidentes desconhecida

Meios impactados

Meio impactado	Propriedade	
	Dentro	Fora
solo superficial	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
subsolo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
águas superficiais	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
águas subterrâneas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
sedimentos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
biota	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

existência de fase livre

existência de POPs

Contaminantes

metais fenóis

outros inorgânicos biocidas

solventes halogenados ftalatos

solventes aromáticos dioxinas e furanos

solventes aromáticos halogenados anilinas

PAHs radionuclídeos

PCBs microbiológicos

metano TPH

combustíveis automotivos outros

outros vapores/gases

Medidas emergenciais

isolamento da área (proibição de acesso à área)

ventilação/exaustão de espaços confinados

monitoramento do índice de explosividade

monitoramento ambiental

remoção de materiais (produtos, resíduos, etc.)

fechamento/interdição de poços de abastecimento

interdição edificações

proibição de escavações

proibição de consumo de alimento

Medidas de controle institucional

restrição	proposta na avaliação de risco ou no plano de intervenção	comunicada ao órgão responsável	implantada
uso de solo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
uso água subterrânea	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
uso água superficial	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
consumo alimentos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
uso de edificações	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
trabalhadores de obras			

Medidas de remediação

bombeamento e tratamento oxidação química barreira física

extração de vapores do solo (SVE) redução química barreira hidráulica

air sparging barreiras reativas biorremediação

biosparging lavagem de solo fitorremediação

bioventing remoção de solo/resíduo biopilha

extração multifásica recuperação fase livre atenuação natural monitorada

descloração reductiva encapsulamento geotécnico outras

tratamento térmico in situ cobertura de resíduo/solo contaminado sem medida de remediação

Medidas de controle de engenharia

adequação de projeto impermeabilização pavimentação outras



Diretoria de Avaliação de Impacto Ambiental

Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental

CETESB

dezembro/2020

Página 3440 de 6434

Anexo II - Investigação Detalhada segundo a DD 038/2017/C

A etapa de Investigação Detalhada tem como objetivo caracterizar o meio físico onde se insere a Área Contaminada sob Investigação (ACI), determinar as concentrações das substâncias químicas de interesse nos diversos meios avaliados, definir tridimensionalmente os limites das plumas de contaminação, quantificar as massas das substâncias químicas de interesse, considerando as diferentes fases em que se encontram, caracterizar o transporte das substâncias químicas de interesse nas diferentes unidades hidroestratigráficas e sua evolução no tempo e caracterizar os cenários de exposição necessários à realização da etapa de Avaliação de Risco.

A Investigação Detalhada deverá ser planejada com base no Modelo Conceitual 2 (MCA 2) desenvolvido a partir dos dados e resultados obtidos na Avaliação Preliminar e na Investigação Confirmatória, devendo ser consideradas as informações contidas no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas e o que estabelecem as normas técnicas nacionais e internacionais relacionadas às técnicas de investigação.

Nesta etapa, visando subsidiar a execução da etapa de Avaliação de Risco, será necessário estabelecer as substâncias químicas de interesse e determinar suas concentrações nos meios investigados, especialmente nos *hot spots* ou centros de massa, assim como as concentrações que atingem ou atingirão os receptores identificados, tanto na área interna como nas áreas externas. Essa determinação deve ser realizada com base nos resultados analíticos obtidos por meio de métodos diretos de investigação e por meio de modelos matemáticos para determinação das concentrações no futuro.

Após a finalização dos trabalhos de Investigação Detalhada as plumas de contaminação, com origem na área investigada, deverão estar integralmente delimitadas no plano horizontal e vertical. Os *hot spots* ou centros de massa de todas as plumas de contaminação, para cada uma das substâncias químicas de interesse identificadas, deverão ter sido investigados com a resolução adequada, de modo a proporcionar a delimitação da sua distribuição espacial e permitir a quantificação das massas das substâncias químicas de interesse presentes.

Os resultados obtidos durante a etapa de Investigação Detalhada deverão compor o Modelo Conceitual 3 (MCA 3), que deverá demonstrar que as informações obtidas são suficientes para embasar a realização das etapas de Avaliação de Risco e Elaboração do Plano de Intervenção.

Observação 1: Recomenda-se a utilização de métodos de investigação de alta resolução na investigação de áreas com complexidades associadas ao meio físico e à distribuição das substâncias químicas de interesse, além da localização de fontes primárias de contaminação não identificadas nas etapas de Avaliação Preliminar e Investigação Confirmatória.

Observação 2: A investigação dos casos de contaminação associada a compostos orgânicos voláteis deverá incluir o mapeamento das plumas de vapores para a investigação direta dos cenários de intrusão de vapores.

Observação 3: Caso sejam identificadas novas fontes potenciais ou fontes primárias de contaminação que não tenham sido investigadas na etapa de Investigação Confirmatória, essas fontes deverão ser caracterizadas durante a execução da Investigação Detalhada.

Observação 4: A destinação dos solos e resíduos, além de outros materiais, provenientes das atividades relacionadas à Investigação Detalhada deverá considerar o que estabelece o ANEXO B, deste ANEXO 2.

Observação 5: Os laudos analíticos das amostras de solo e águas subterrâneas e outros materiais avaliados deverão estar de acordo com o definido na norma ISO – IEC 17025, devendo necessariamente ser identificados o local onde foi coletada a amostra (nome e endereço), o ponto de amostragem, as datas em que as amostras foram coletadas e a extração e a análise foram realizadas, os métodos analíticos adotados, os fatores de diluição, os limites de quantificação, os resultados do branco de laboratório, da recuperação de traçadores (*surrogate*) e da recuperação de amostra padrão. Os laudos deverão ser acompanhados da ficha de recebimento de amostras (*check list*) emitida pelo laboratório no ato de recebimento das amostras e da cadeia de custódia referente às amostras coletadas, devidamente preenchidas e assinadas.

Observação 6: Os procedimentos de amostragem e análises químicas deverão observar o disposto na Resolução SMA nº 100, publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo em 22.10. 2013 e na Decisão de Diretoria Nº 310/2014/E/C/I, de 21 de outubro de 2014.

Observação 7: Na área atingida pelas plumas de contaminação das águas subterrâneas, incluindo sua possível expansão, deverá ser efetuado um levantamento identificando os poços de abastecimento e outros tipos de captação de água que possam ser atingidos, os quais deverão ser submetidos à caracterização da qualidade das suas águas.

Observação 8: Caso seja identificada a existência de perigo, a CETESB deverá ser comunicada de imediato pelo Responsável Legal.

Relatório de Investigação Detalhada

O Relatório de Investigação Detalhada deverá conter as seguintes informações:

- a) Texto explicativo sobre a caracterização do meio físico, com plantas e seções estratigráficas e modelos tridimensionais representativos das rochas, sedimentos, solos e aterros identificados no local, especificando o tipo de porosidade (intergranular ou fratura) presente para cada material ou unidade hidroestratigráfica identificada;
- b) Georreferenciamento das sondagens, pontos de amostragem (solo e água, além de outros meios) e poços de monitoramento;
- c) Representação do perfil de cada sondagem realizada, indicando as unidades hidroestratigráficas ou materiais observados (definidos a partir de observações em campo e de análises granulométricas) e suas espessuras, a profundidade do nível d'água, os resultados de medições realizadas em campo e a indicação das profundidades de amostragem para análises químicas e para determinação das propriedades físicas do meio;
- d) Descrição dos procedimentos efetuados durante a instalação de cada poço de monitoramento (perfuração, montagem e desenvolvimento);
- e) Perfil construtivo de cada poço de monitoramento, com a justificativa para o seu posicionamento e da seção filtrante, levando em consideração a distribuição das substâncias químicas de interesse, unidades hidroestratigráficas responsáveis pelo armazenamento e pela movimentação preferencial dos contaminantes;
- f) Tabela com os seguintes dados relativos aos poços de monitoramento: profundidade do nível da água subterrânea, profundidade da detecção de produto em fase livre, altura da coluna de fase livre, cota topográfica dos poços, cargas hidráulicas e condutividade hidráulica;
- g) Documentação fotográfica relativa aos serviços de campo;
- h) Texto explicativo com os resultados e interpretação dos métodos de investigação de alta resolução (quando esses forem utilizados), com a apresentação dos resultados em planta e seções transversais e longitudinais;

- i) Texto explicativo com a interpretação dos ensaios destinados à caracterização das propriedades físicas e químicas dos materiais;
- j) Texto explicativo sobre os dados hidrogeológicos obtidos para todos os materiais identificados (porosidade total e efetiva, condutividade hidráulica), destacando as unidades hidroestratigráficas de importância para o transporte e a retenção dos contaminantes;
- k) Plantas e seções representando as superfícies de mesmo potencial hidráulico (nos planos horizontal e vertical) e as relações hidráulicas com os corpos d'água superficiais, poços de captação, nascentes e sistemas de drenagem ou de rebaixamento do nível d'água;
- l) Especificar as substâncias químicas de interesse e o critério empregado para a seleção das mesmas;
- m) Quantificação e caracterização das contaminações associadas a todas as fontes primárias de contaminação, determinando as concentrações das substâncias químicas de interesse a elas associadas que possam estar presentes em fase livre, dissolvida, gasosa e retida, delimitando tridimensionalmente as plumas de contaminação e calculando as massas das substâncias químicas de interesse nas diferentes unidades hidroestratigráficas identificadas;
- n) Texto explicativo sobre a caracterização das contaminações, com plantas, seções e modelos tridimensionais representativos da distribuição das substâncias químicas de interesse identificadas no local, considerando as diferentes unidades hidroestratigráficas e meios que compõem o subsolo (ar, água e solo/rocha);
- o) Planta e seções, com a localização e dimensionamento das fontes potenciais, primárias e secundárias de contaminação, com a representação da localização dos pontos de amostragem executados;
- p) Texto com justificativa da escolha do posicionamento dos pontos de amostragem e das profundidades de investigação;
- q) Texto com descrição dos métodos de investigação e amostragem utilizados, justificando as escolhas realizadas;
- r) Texto e representações gráficas da distribuição das substâncias químicas de interesse (tridimensional), em fase livre, retida, dissolvida e gases/vapores, modelada para o tempo em que será atingida a concentração máxima onde estão localizados os receptores identificados, quando aplicável;

- s) Laudos analíticos, ficha de recebimento de amostras emitida pelo laboratório e as cadeias de custódia devidamente assinadas pelo profissional responsável pelas análises;
- t) Texto e ilustrações com a atualização do Modelo Conceitual (MCA 3), desenvolvido a partir dos resultados obtidos na Investigação Detalhada, acompanhado de discussão dos resultados obtidos, das limitações do MCA 3 e das recomendações de ações a serem realizadas em vista dos resultados obtidos;
- u) Identificação de todos os Responsáveis Legais e do Responsável Técnico (conforme artigo 18 do Decreto nº 59.263/2013), especificando os respectivos *e-mails* e endereços completos;
- v) Declaração de Responsabilidade, conforme modelo indicado no ANEXO A, devidamente assinada pelos Responsáveis Legal e Técnico.

Todas as plantas geradas nesse relatório deverão ser georreferenciadas, contendo as coordenadas geográficas em UTM (SIRGAS 2000).

O Relatório de Investigação Detalhada deverá ser entregue à CETESB em atendimento às exigências técnicas ou por ocasião da solicitação de parecer técnico. Em quaisquer dessas situações, o relatório de Investigação Detalhada deverá ser gerado em arquivo digital, em formato PDF.

Anexo III – Avaliação de Risco segundo a DD 038/2017/C

Os objetivos da Avaliação de Risco são caracterizar a existência de risco aos receptores identificados, expostos e potencialmente expostos às substâncias químicas de interesse presentes na Área Contaminada sob Investigação (ACI) e decidir sobre a necessidade de implementação de medidas de intervenção.

A Avaliação de Risco deverá ser desenvolvida considerando todas as informações geradas nas etapas anteriores, especialmente o Modelo Conceitual gerado ao final da Investigação Detalhada (MCA 3), devendo ser observadas as orientações contidas no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas e normas técnicas nacionais e internacionais. Ao final da execução da etapa de Avaliação de Risco deverá ser elaborado o Modelo Conceitual 4 (MCA 4).

Desta forma, deverão ser desenvolvidas as ações descritas nos itens 4.1.6.1 a 4.1.6.6, quando aplicáveis, para avaliar os riscos relacionados às diferentes situações citadas. Destaca-se que deverão ser executadas somente as ações correspondentes àqueles receptores expostos ou potencialmente expostos que efetivamente tenham sido identificados na Área Contaminada sob Investigação (ACI) ou em sua vizinhança.

De acordo com o artigo 36 do Decreto nº 59.263/2013 as seguintes situações podem caracterizar a existência de risco acima dos níveis aceitáveis em uma área, determinando sua classificação como Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi):

I – Realizada Avaliação de Risco foi constatado que os valores definidos para risco aceitável à saúde humana foram ultrapassados, considerando-se os níveis de risco definidos por meio de Resolução conjunta da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e da Secretaria Estadual de Saúde, após ouvido o CONSEMA;

II – Quando for observado risco inaceitável para organismos presentes nos ecossistemas, por meio da utilização de resultados de Avaliação de Risco Ecológico;

III – Nas situações em que os contaminantes gerados em uma área tenham atingido compartimentos do meio físico e determinado a ultrapassagem dos padrões legais aplicáveis ao enquadramento dos corpos d'água e de potabilidade;

IV – Nas situações em que os contaminantes gerados possam atingir corpos d'água superficiais ou subterrâneos, determinando a ultrapassagem dos padrões legais aplicáveis, comprovadas por modelagem do transporte dos contaminantes;

V – Nas situações em que haja risco à saúde ou à vida em decorrência de exposição aguda a contaminantes, ou à segurança do patrimônio público e privado."

Por outro lado, após a realização da etapa de Avaliação de Risco, não tendo sido verificada qualquer das situações indicadas no artigo 36 do Decreto nº 59.263/2013, a área será classificada como Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME), devendo ser iniciada a etapa de Monitoramento para Encerramento, conforme item 4.2.3.

Avaliação de Risco à Saúde Humana

A Avaliação de Risco à Saúde Humana, visando à determinação dos riscos e das Concentrações Máximas Aceitáveis (CMA) para os receptores humanos identificados, deverá ser realizada por meio do uso da Planilha para Avaliação de Risco para Áreas Contaminadas sob Investigação da CETESB.

No desenvolvimento da Avaliação de Risco à Saúde Humana deverão ser adotados os seguintes procedimentos:

- a) Identificar as unidades de exposição;
- b) Identificar os receptores humanos considerando o uso atual e futuro da área, em cada unidade de exposição, bem como os receptores que se situam fora da área de exposição, mas que possam vir a ser atingidos em decorrência da expansão da pluma de contaminação;
- c) Identificar as substâncias químicas de interesse em cada unidade de exposição;
- d) Identificar todos os caminhos de exposição presentes e potenciais, atuais e futuros, para todos os em cada unidade de exposição;
- e) Calcular o risco para cada substância química de interesse considerando os diferentes receptores e caminhos de exposição, para cada unidade de exposição;
- f) Calcular o risco total para cada unidade de exposição, por receptor, considerando a soma dos riscos individuais das Substâncias Químicas de Interesse, agrupando-as em função dos seus efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos;

- g) Calcular as Concentrações Máximas Aceitáveis para as Substâncias Químicas de Interesse existentes, para cada meio, considerando cada caminho de exposição e receptor identificado;
- h) Apresentar mapas de risco com a indicação dos receptores e dos *hot spots*;
- i) Apresentar conclusão sobre a necessidade de implementação de medidas de intervenção.

Para a conclusão acerca da existência de risco deverá ser adotado o valor de 1×10^{-5} como o limite aceitável de risco total à saúde humana para exposição a substâncias carcinogênicas. Para substâncias não carcinogênicas o valor correspondente ao limite de aceitação para o quociente de risco total será igual a 1 (um). Essas referências serão aplicadas até a publicação de Resolução Conjunta da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e da Secretaria Estadual de Saúde que fixará os níveis de risco aceitáveis à saúde humana, como determina o inciso I do artigo 36 do Decreto nº 59.263/2013.

Observação 1: Os cálculos do risco deverão se basear nas maiores concentrações detectadas junto aos receptores ou decorrentes do tratamento estatístico das concentrações determinadas em cada Unidade de Exposição;

Observação 2: No caso das substâncias com efeitos não carcinogênicos a soma dos riscos individuais poderá se aplicar somente às substâncias que possuam mecanismos semelhantes de ação, devidamente demonstrados com base em estudos toxicológicos publicados.