Elaboração de Diagnóstico de Contaminação e Proposta de Remediação do Antigo Lixão da Estrutural

PRODUTO 2

CONSOLIDAÇÃO DO DIAGNÓSTICO DA CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS, SUBTERRÂNEAS E DOS SOLOS, PROPOSIÇÃO DO MAPA POTENCIOMÉTRICO DO AQUÍFERO FREÁTICO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Brasília, Outubro de 2020.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1
2. CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS 1
2.1 Introdução 1
2.2 Estudo Geofísico 2
2.2.1 Método Adotado - Arcabouço Teórico 5
2.2.2 Aquisição dos Dados 8
2.2.3 Resultados 8
2.2.4 Interpretação dos Resultados 10
2.3 Poços de Monitoramento 12
2.3.1 Construção dos Poços de Monitoramento 12
2.3.2 Métodos Analíticos e Procedimentos de Coleta de Amostras 18
2.3.3 Resultados das Análises Químicas 18
2.3.4 Mapa da Extensão da Pluma de Contaminação 24
3. MAPA POTENCIOMÉTRICO 26
3.1 Método de Interpolação 26
3.2 Sentido do Fluxo Subterrâneo 31
4. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS 32
4.1 Escolha dos pontos de Amostragem e Monitoramento 32
4.2 Métodos Analíticos 33
4.3 Resultados das Análises Hidroquímicas 33
4.4 Extensão da Contaminação das Águas Superficiais 34
5. CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS 36
5.1 Materiais e Métodos 36
5.2 Resultados das Análises e Discussão 41
5.2 Mapa da Extensão da Contaminação dos Solos 49
6. CONTAMINAÇÃO ATMOSFÉRICA 50
7. CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE RESÍDUOS 55
7.1 Caracterização dos Tipos de Resíduos 55
8. DADOS PARA ALIMENTAÇÃO DOS MODELOS DE FLUXO 59
8.1 Condutividade Hidráulica da Zona Não Saturada 59
8.1 Condutividade Hidráulica da Zona Saturada 63
Slug Tests - Base Teórica 63
Slug Tests - Resultados e Interpretações 65
8.2 Geologia e Hidrogeologia 67
9. CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS 70
9.1 Caracterização Física dos Resíduos 70
9.2 Quantificação dos Resíduos Acumulados 81
10. EXPERIÊNCIAS DE BOAS PRÁTICAS PARA REMEDIAÇÃO DE LIXÕES 86
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS 91
12. REFERÊNCIAS 93
13. EQUIPE TÉCNICA 96

Índice de Figuras

Figura 1- Cartograma dos limites do lixão retificado com uso de sondagens mecânicas e manuais (Campos et al. 2006). 3
Figura 2 - Distribuição das seções geofísicas realizadas nos limites da área do Lixão da Estrutural. **AC** - área contaminada, **AS** - área levemente contaminada e **NA** - área não contaminada (Cavalcanti, 2013). 4
Figura 3 - **A**: localização das linhas com relação ao maciço de resíduos. **B**: Linha L3, mostrando a presença de chorume distribuído na porção superior em até 50 metros de espessura (arranjo Dipolo-Dipolo). **C**: Linha L4, mostrando presença de chorume a profundidades de cerca de 20 metros ao sul e até mais de 75 metros na porção norte da linha coincidente com a principal faixa de acumulação de resíduos na porção central do lixão da Estrutural (arranjo Dipolo-Dipolo) (Guedes, 2019). 5
Figura 4 - Esquema da distribuição dos eletrodos no solo durante uma aquisição de eletrorresistividade. As linhas cheias indicam o fluxo de corrente no solo, ao passo que as linhas pontilhadas indicam as linhas de equipotenciais geradas pela corrente. 6
Figura 5 - Esquema sequencial de aquisição de dados utilizado em caminhamentos elétricos com o arranjo dipolo-dipolo (adaptada de Elis, 1998). 7
Figura 6 - Fotografias mostrando o equipamento Syscal em atividade de levantamento de campo. 9
Figura 7- Localização das seções geofísicas levantadas neste trabalho e no ano de 2013 (Cavalcanti, 2013). As linhas pontilhadas se referem a *buffers* com faixas de 200 metros a partir dos limites da área que historicamente foi local de acumulação de resíduos. 10
Figura 8 - Mapa preliminar da pluma de contaminação por chorume do antigo Lixão da Estrutural, baseado exclusivamente nos resultados do estudo geofísico, com inserção das seções geofísicas. Para melhor avaliação das seções individuais, observar as ilustrações em maior escala apresentadas nas seções da Figura 7. Mapa produzido a partir da integração dos dados geofísicos deste projeto, dados de Cavalcanti (2013), de Guedes (2019), dados do limite da pluma apresentados por Campos et al. (2006), além da confirmação da contaminação no poço da rede de monitoramento da ADASA. 12
Figura 9 - Localização geográfica dos poços de monitoramento das águas subterrâneas. 13
Figura 10 - Perfuração do poço LX14, mostrando a torre com sistema hidráulico, as hastes metálicas e a caixa de circulação de lama. O caminhão pipa situado ao lado da torre do sistema hidráulica fornece água para circulação no interior do conduto. 15
Figura 11 - Amostra de calha coletada na entrada da caixa de lama durante a perfuração do poço LX 12. Notar que se trata de areia grossa com grãos esféricos típicos dos observados no topo da Formação Ribeirão Piçarrão do Grupo Paranoá. 15
Figura 12 - Detalhes dos tubos de PVC Geomecânico de 4 polegadas utilizados na coluna de revestimento e filtro nos poços de monitoramento instalados pelo presente estudo. 15
Figura 13 - Detalhe do pré-filtro utilizado na maior parte dos poços. 16
Figura 14 - Sistema de proteção triplo, composto por cap de PVC rosqueável, tubo de aço carbono com tampa e cadeado e manilha em concreto com tampa. 16
Figura 15 - Cerca de proteção de poços instalados na área urbana da Cidade Estrutural. 16
Figura 16 - Amostragem de água no poço LX3 situado no Parque Nacional de Brasília. Notar o detalhe dos pesos acoplados no corpo do bailer. A água se apresenta turva, pois a obra do poço havia sido recém-concluída. 19
Figura 17 - Sonda multiparâmetro YSI Professional Plus e sonda HQ 40d da Hach Instruments, utilizadas para coleta dos parâmetros (pH, temperatura, total de sólidos dissolvidos (TDS), e condutividade elétrica (CE). 19
Figura 18 - Distribuição da pluma de contaminação por chorume baseada na condutividade elétrica do fluído (medição realizada em agosto e 2020). 25
Figura 19 - Potenciometria com base no relevo antes da acumulação dos resíduos na área. 28
Figura 20 - Potenciometria com base no relevo atual (pós-acumulação dos resíduos na área). Medidas de níveis realizadas em agosto de 2020. 29
Figura 21 - Espessura da zona vadosa do aquífero freático, representado por latossolos e por resíduos acumulados. 30
Figura 22 - Mapa do sentido de fluxo das águas subterrâneas. Este padrão de fluxo deverá controlar a migração da pluma de contaminação. 32
Figura 23 - Distribuição qualitativa das águas dos cursos superficiais das três bacias que drenam a partir da área do Lixão da Estrutural. 35
Figura 24 - Amostragem de solo superficial com uso de cavadeira articulada. 38
Figura 25 - Amostragem de solo em profundidade de 60 cm com auxílio de trado manual. 38
Figura 26 - Amostras em diferentes profundidades em um mesmo ponto. 38
Figura 27 - Difratogramas de Raios X das amostras SO-15A e SO-15B. **tot** - representa a amostra total analisada pelo método do pó. **n** - representa a separação da fração argilosa. 46
Figura 28 - Mapa da Distribuição das áreas com diferente potencial de contaminação. A confirmação da contaminação é feita por análises químicas específicas ou com base em informações qualitativas. 51

Figura 29 - Distribuição mensal da poluição atmosférica no ano de 2008 no Centro da cidade de Taguatinga. Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008). 53
Figura 30 - Variação de componentes indicadores de qualidade do ar nas adjacências da fábrica de cimento Planalto (Ciplan). Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008). 54
Figura 31 - Resíduos observados em trincheira rasa aberta na área urbana da Cidade Estrutural. Notar a ampla predominância de plástico. 56
Figura 32 - Resíduos expostos em área que foi gradeada para implantação de experimento de fitorremediação. 56
Figura 33 - Distribuição dos resíduos na área do Lixão, incluindo áreas de acumulação histórica e área de acumulação mais recente 58
Figura 34 - Ensaio de infiltração in situ com o método dos anéis concêntricos. 60
Figura 35 - Ensaio de infiltração in situ com método Open End Hole. 61
Figura 36 - Adição de água ao poço a fim de se elevar o nível estático para averiguação das condições de recuperação. 63
Figura 37 - Ilustração esquemática do teste tipo Slug com parâmetros geométricos utilizados na análise da condutividade hidráulica pelo método de Bouwer & Rice (1976). Poço parcialmente penetrante. Extraído de Pede (2004). 64
Figura 38 - Geologia da área de estudo, eliminada a as coberturas de solos. 69
Figura 39 - Localização dos pontos de amostragem para análises gravimétricas (GRA) e de observação qualitativa em taludes existentes e em área de deposição atual de resíduos (GRQ). 71
Figura 40 - Abertura da trincheira GRA - 06 com a retirada e homogeneização dos resíduos. Detalhe para o tecido Geotêxtil retirado 72
Figura 41 - Baldes de 30 litros de capacidade utilizados nas operações de medição da massa dos rejeitos. 72
Figura 42 - Detalhe de operação de pesagem com auxílio de corda e balança digital. 73
Figura 43 - Exemplo de material já retirado e classificado segundo sua natureza (plástico, madeira, concreto e terra). 73
Figura 44 - Exemplo de terra obtida do interior da trincheira. Observar o aspecto heterogêneo e contaminado do material, que inclui pequenos fragmentos de vidro, madeira e rocha. 74
Figura 45 - Madeira retirada da escavação da amostra GRA - 04. Predominância de madeira utilizada em obras (tábuas e tarugos). 74
Figura 46 - Exemplos de material metálico obtido da amostra GRA - 02. Presença comum de vergalhões, além de latas e outros fragmentos. 75
Figura 47 - Material classificado como tecido (amostra GRA - 02). Na média esta classe de resíduos inclui pano de algodão, tecidos sintéticos e bidin. 75
Figura 48 - Entulho de obra (também classificado como concreto ou escombro), composto por blocos de concreto, revestimentos de piso e paredes e fragmentos de rocha de cantaria. 75
Figura 49 - Resíduos classificados como vidro, que é representado por garrafas inteiras ou fragmentos de vidros de diferentes cores. 76
Figura 50 - Exemplo de plástico obtido da amostragem no ponto GRA – 02. Observar a diversividade de origem dos materiais. 76
Figura 51 - Exemplo de papel obtido da escavação da amostra GRA - 02. Este tipo de material não é comum, sendo apenas encontrado em aterro recente. Nas amostras de resíduos antigos esta classe de material já foi totalmente decomposta em conjunto com a porção orgânica. 77
Figura 52 - Resíduo depositado entre os dias 08 e 10 de setembro de 2020. No extremo esquerdo da imagem predominam materiais plásticos, na porção central há predominância de escombros de obras e na parte esquerda ocorre exclusivamente material vegetal de podas de árvores. Pilha com média de 2 metros de elevação. 78
Figura 53 - Modelo Digital de Elevação - MDE do antigo Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural. 83
Figura 54 – Localização geográfica dos 21 poços de monitoramento ambiental. 109
Figura 55 - Broca tricônica com 7 polegadas de diâmetro utilizada no método de circulação de lama. À direita, saprolito de ardósia da Formação Ribeirão do Torto, material geológico que permite a utilização dessa forma de sondagem. 111
Figura 56 - Bitter de 8 polegadas de diâmetro utilizado no método roto-pneumático. À direita, saprolito de quartzito médio a grosso da Formação Ribeirão Piçarrão. 111
Figura 57 - Hastes com 3 metros de comprimento utilizadas para rotação tanto da broca tricônica como do bitter. 112
Figura 58 - Tubos de PVC geodinâmico utilizados para o revestimento dos poços. Os tubos lisos possuem 4 metros de comprimento, enquanto os filtros 2 metros. À direita, foto em detalhe mostrando as ranhuras dos filtros em comparação com os tubos lisos. 113
Figura 59 - Par de caps que vedam as duas extremidades dos conjuntos de revestimento. 113
Figura 60 - Seixos de quartzo moderadamente selecionados e subarredondados usados como pré-filtro. 114
Figura 61 - Etapa de concretação do poço com o auxílio de masseira para melhor distribuição do concreto e preservação da área do Parque Nacional. 115
Figura 62 - Todos os poços contam com ao menos 3 proteções: Cap, cabeça de ferro com cadeado e manilha com tampa. 116
Figura 63 - Os poços localizados na área urbana também foram cercados com fios de arame farpado. 116

Figura 64 - Pontos de amostragem escolhidos. Os círculos vermelhos indicam os locais onde foram realizadas as caracterizações e medições analíticas, enquanto os triângulos azuis representam os pontos de análise qualitativa. 157
Figura 65 – Principais equipamentos utilizados na etapa de campo. 158
Figura 66 - Fotografia demonstrando a etapa de escavação dos pontos. O material classificado como aterro esta disposto à direita, enquanto o material analisado ocorre ao lado esquerdo da escavadeira. 159
Figura 67 - Fotografia mostrando a etapa de separação das classes de resíduos. Importante ressaltar que as classes foram selecionadas a partir da observação prévia do ponto. 160
Figura 68 - Fotografia demonstrando a pesagem dos resíduos. 161
Figura 69 - Classes de materiais separadas no ponto GRA-01 162
Figura 70 - Classes de materiais separadas no ponto GRA-02 163
Figura 71 - Classes de materiais separadas no ponto GRA-03 164
Figura 72 - Classes de materiais separadas no ponto GRA-04 165
Figura 73 - Classes de materiais separados no ponto GRA-05. 166
Figura 74 - Classes de materiais separados no ponto GRA-06. 167
Figura 75 - Tendência composicional do lixo mais antigo do aterro. Destaca-se a grande quantidade de plástico e solo usado para aterrar o material. Madeira e metais ocorrem apenas pontualmente. 168
Figura 76 - Fotografia mostrando corte de talude e disposição do material na porção oeste mais antiga do aterro. . 168
Figura 77 - Aterramento mostrando como é a disposição do material logo após a deposição. 169
Figura 78 - Fotografia tirada perto do ponto GRA-01 que mostra o exato momento da colocação do material no aterro, o que corrobora com o observado no ponto GRQ-03 169
Figura 79 - Vista panorâmica do aterro no exato momento de deposição dos resíduos. 170

1. INTRODUÇÃO

O presente documento técnico é parte integrante do estudo intitulado "*Elaboração do Diagnóstico da Contaminação e Proposta de Remediação do Antigo Lixão da Estrutural*" e representa o Produto 2 conforme Termo de Referência que norteia a realização dos estudos. Neste relatório técnico são apresentados resultados e avaliações referentes à contaminação das águas subterrâneas, qualidade das águas superficiais, contaminação dos solos, mapa potenciométrico e caracterização preliminar dos resíduos sólidos.

Para a cartografia dos limites da pluma de contaminação das águas subterrâneas foram integrados dados de estudos geofísicos e de qualidade das águas a partir de amostragem direta em poços de monitoramento especificamente instalados para fins de avaliação potenciométrica e hidroquímica. O estudo geofísico foi realizado a partir da integração de resultados de três trabalhos prévios realizados na área, além do levantamento geofísico realizado pelo presente projeto. Os trabalhos existentes são representados pela seguinte literatura: Campos *et al.* (2006); Cavalcanti (2013) e Guedes (2019).

Para a caracterização da contaminação dos solos foram realizadas análises químicas e avaliação qualitativa dos diferentes usos das terras nas adjacências da área do Lixão da Estrutural.

O texto será organizado da seguinte forma: apresentação dos resultados da contaminação das águas subterrâneas, qualidade dos recursos hídricos superficiais, mapa potenciométrico, contaminação dos solos e caracterização dos resíduos sólidos. O estudo geofísico que foi fundamental para a determinação dos limites da pluma de contaminação de chorume será apresentado em subitem específico no diagnóstico da contaminação dos recursos hídricos subterrâneos. Dados obtidos de amostragens de águas nos poços de monitoramento, integrados com resultados dos estudos geofísicos deverão resultar na proposição do mapa dos limites da pluma de contaminação dos aquíferos freáticos.

2. CONTAMINAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

2.1 Considerações Iniciais

A contaminação dos aquíferos situados em área sob influência do Lixão da Estrutural é considerado o principal impacto ambiental decorrente da disposição sem controle dos resíduos do Distrito Federal por décadas, sem a devida aplicação de medidas mitigadoras.

Para a determinação da contaminação pela migração da pluma de chorume e para a delimitação de seus limites e concentrações dos efluentes em profundidades serão integrados dados de dois estudos interdependentes. O primeiro se refere ao Estudo Geofísico representado por pesquisa indireta com medições da resistividade do fluido abaixo da superfície do terreno. O

segundo se refere à locação e construção de poços de monitoramento, além da avaliação da composição química de amostras de águas destes poços.

A integração dos resultados do estudo geofísico e do monitoramento das amostras de águas subterrâneas possibilitará a determinação dos limites da pluma de contaminação de chorume, bem como confeccionar mapa de isoconcentração de substâncias ou parâmetros consideradas melhores indicadores da presença do extrato dos resíduos na água subterrânea.

2.2 Estudo Geofísico

Além dos dados obtidos no presente estudo, outros estudos realizados na região serão integrados para se alcançar o objetivo de determinação dos prováveis limites da pluma de contaminação, incluindo os trabalhos de Campos *et al.* (2006); Cavalcanti (2013) e Guedes (2019).

O relatório de Campos *et al.* (2006) é utilizado, uma vez que traz o limite da antiga área de aterro de resíduos com relativa precisão. Os trabalhos de Cavalcanti (2013) e Guedes (2019) são importantes, pois utilizaram o mesmo método geofísico e o mesmo arranjo eletródico aplicado no presente trabalho. A integração dos trabalhos anteriores com a pesquisa atual foi realizada por interpolação em ambiente de Sistema de Informação Geográfica e checagem visual das diferentes fontes de informações.

O trabalho de Campos *et al.* (2006) teve como objetivo determinar os limites da poligonal de acumulação de resíduos durante os anos 1970, uma vez que não existiam mapas de localização ou de progressão de avanço das áreas de aterros. Naquela época o aterro era operado de forma tradicional com trincheiras de 4 a 5 metros de profundidade preenchidas com resíduos e com posterior aterramento e compactação.

A Figura 1 mostra o principal resultado do estudo, que foi realizado a partir de sucessivas sondagens mecânicas e manuais, de forma a se determinar com precisão os limites do antigo aterro.

A tentativa de se aplicar métodos geofísicos foi infrutífera, uma vez que por se tratar de área urbana densamente ocupada não foi viável o uso de métodos elétricos que são os mais adequados para o objetivo.

Este resultado é importante, pois a área de acumulação de resíduos é a fonte a partir da qual o chorume deverá se espalhar segundo o gradiente hidráulico local. Outro aspecto importante é a definição dos volumes aterrados. No início da operação do lixão, o sistema utilizado era a partir de células relativamente rasas (~5 metros de profundidade) em que os resíduos eram compactados e em seguida aterrados com solos estocados das próprias células. Posteriormente em função da restrição das áreas disponíveis para o acúmulo dos resíduos, se optou por um sistema de empilhamento compondo uma espessa massa de resíduos com

acumulação de volumes de milhares de metros cúbicos. Assim pode-se prever que o chorume oriundo do "lixo antigo" deverá apresentar menor densidade e menor volume quando comparado aos efluentes gerados no lixo "mais recente" com empilhamento vertical.

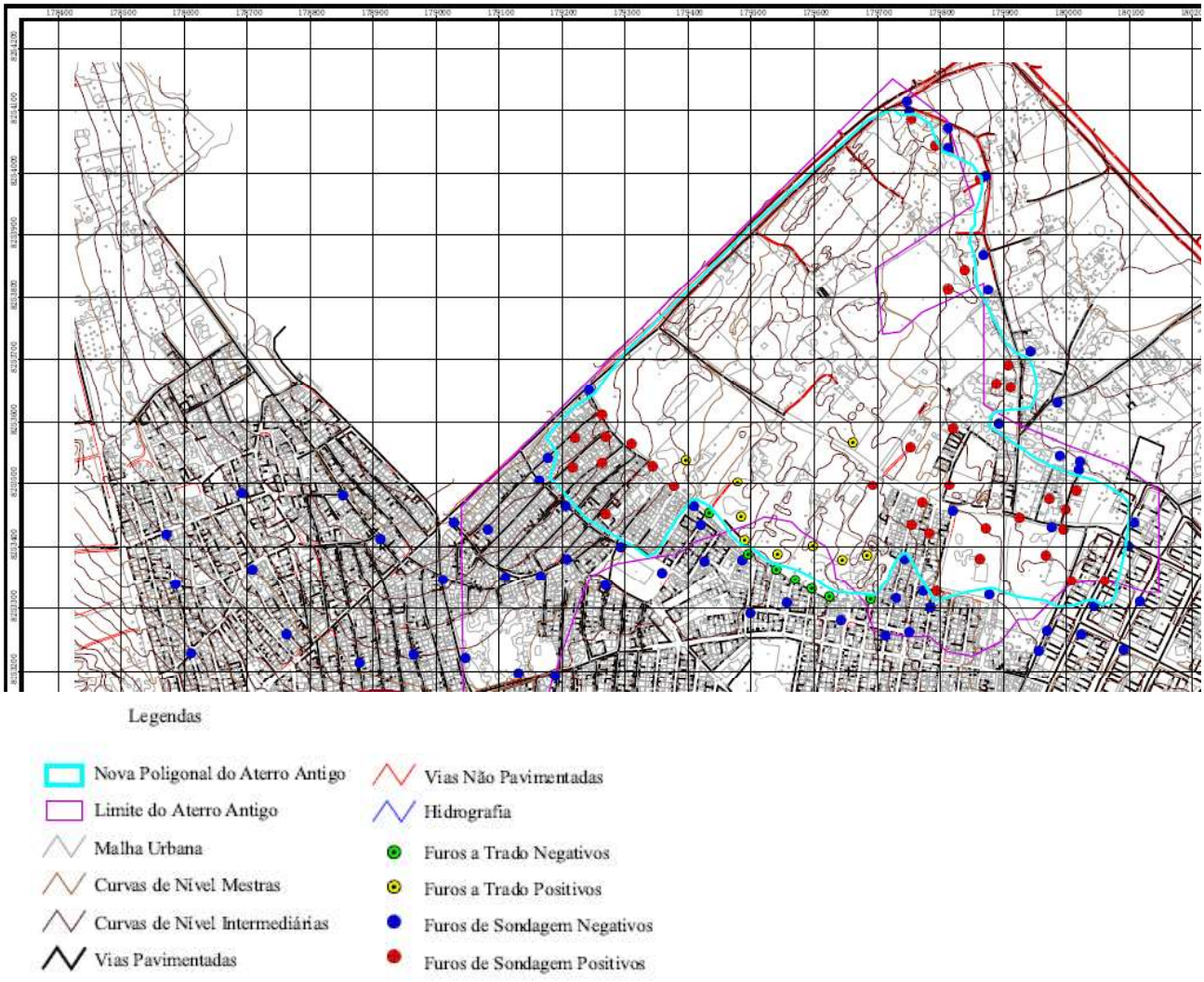


Figura 1- Cartograma dos limites do lixão retificado com uso de sondagens mecânicas e manuais (Campos *et al.* 2006).

O estudo de Cavalcanti (2013) determinou a migração da pluma de contaminação nos limites externos da área do aterro que operou desde os anos 1990 até o ano de 2018. Neste período o sistema de aterro utilizado foi no sentido de verticalização do maciço de resíduos, o qual alcançou mais de 35 metros nos pontos mais elevados. Com esta opção de operação do aterro foi criado um gradiente hidráulico artificial que deve ter acelerado a migração da pluma, principalmente para as direções oeste, sudoeste, sudeste e nordeste.

A Figura 2 mostra a síntese deste trabalho com o posicionamento das seções de eletrorresistividade levantadas em todo o limite da área de acumulação de resíduos.

Neste trabalho não foram instalados poços de monitoramento e os resultados são considerados apenas qualitativos.

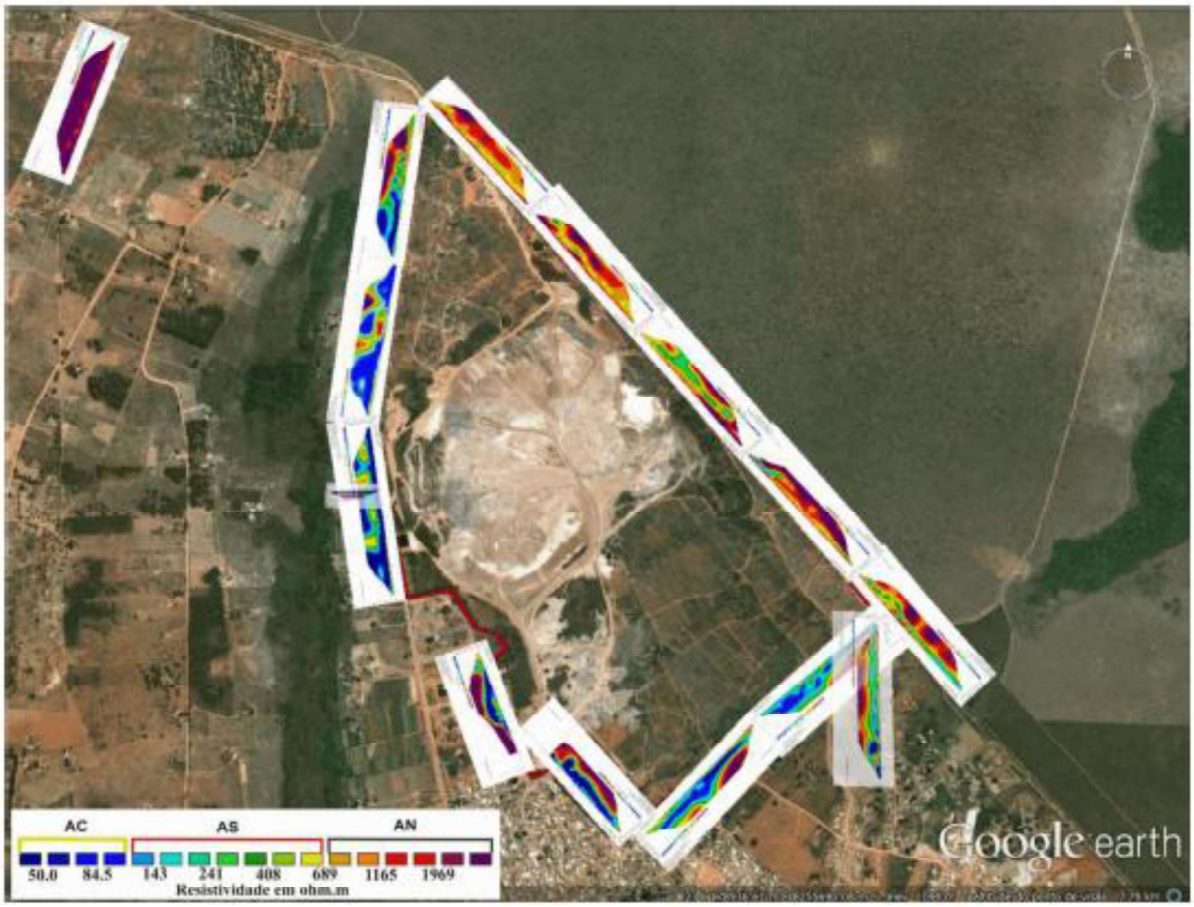


Figura 2 - Distribuição das seções geofísicas realizadas nos limites da área do Lixão da Estrutural. **AC** - área contaminada, **AS** - área levemente contaminada e **NA** - área não contaminada (Cavalcanti, 2013).

O trabalho de Guedes (2019) focou a área do maciço de resíduos no interior da poligonal da área do lixão. Os resultados mostram que nestas condições proximais às áreas de geração dos efluentes o chorume pode alcançar profundidades maiores que 45 metros com as máximas concentrações, equivalentes a resistividades menores que 10 Ω/m.

Dentre os principais resultados destacam-se:

- Dentre os diferentes arranjos eletródicos avaliados Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner e Wenner- Schlumberger o que apresentou a melhor solução para determinar o limite resíduo-rocha foi o caminhamento Dipolo-Dipolo (Figura 3);
- A profundidade do limite resíduo-rocha varia de 25 a 45 metros, a qual foi determinada pela combinação do método elétrico em associação com o método de sísmica de refração;
- O trabalho conclui que a associação dos dois métodos é interessante para estudar aterros de resíduos sólidos, entretanto para que a sísmica funcione de forma mais eficiente nas áreas com maiores espessuras de resíduos, é necessário que a fonte de energia tenha maior potência, como queda de peso ou explosivos;
- Os resultados indicam que a rocha abaixo do maciço de resíduos apresenta suas características geotécnicas modificadas, provavelmente, em função da presença de chorume.

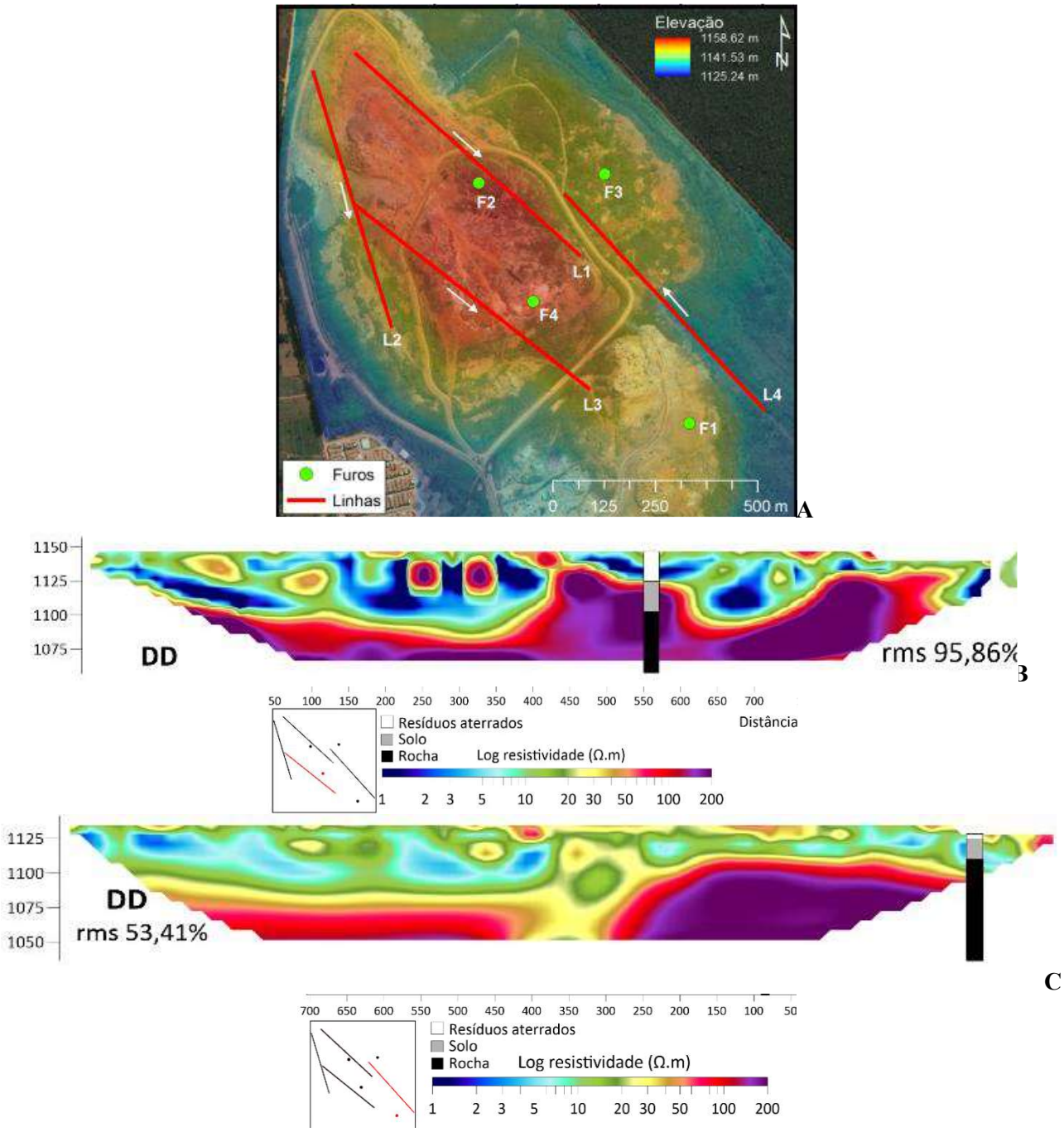


Figura 3 - **A**: localização das linhas com relação ao maciço de resíduos. **B**: Linha L3, mostrando a presença de chorume distribuído na porção superior em até 50 metros de espessura (arranjo Dipolo-Dipolo). **C**: Linha L4, mostrando presença de chorume a profundidades de cerca de 20 metros ao sul e até mais de 75 metros na porção norte da linha coincidente com a principal faixa de acumulação de resíduos na porção central do lixão da Estrutural (arranjo Dipolo-Dipolo) (Guedes, 2019).

2.2.1 Método Adotado - Arcabouço Teórico

Neste projeto foi utilizado o método geofísico de eletrorresistividade, que representa um procedimento relativamente rápido, de fácil aplicação e normalmente, proporciona resultados satisfatórios para diferentes objetivos. A medida da resistividade elétrica do solo, empregando diferentes arranjos de eletrodos, tem sido utilizada, para identificar variações estratigráficas ou para localizar objetos cujas dimensões e profundidades oscilem entre metros até alguns quilômetros. O inconveniente deste método aparece quando se necessita de uma exploração

detalhada, com grande resolução espacial. Em casos como este se faz necessária a aquisição de uma grande quantidade de dados que pode ter sua viabilidade determinada por questões de tempo, de custo ou por alternativas técnicas. Recentemente, têm surgido sistemas automáticos de coleta de dados que podem acelerar os processos de medida e interpretação. Paralelamente, a maior capacidade de cálculos pelos computadores tem permitido a obtenção de imagens em duas ou três dimensões da distribuição real de resistividade do subsolo.

Os dispositivos para medidas de resistividade elétrica consistem, comumente, de um sistema de quatro eletrodos, sendo dois deles usados para enviar uma corrente elétrica (I) no solo (eletrodos C1 e C2, Figura 4), e os outros dois (eletrodos P1 e P2, Figura 4) usados para medir a diferença de potencial (ΔV) entre eles.

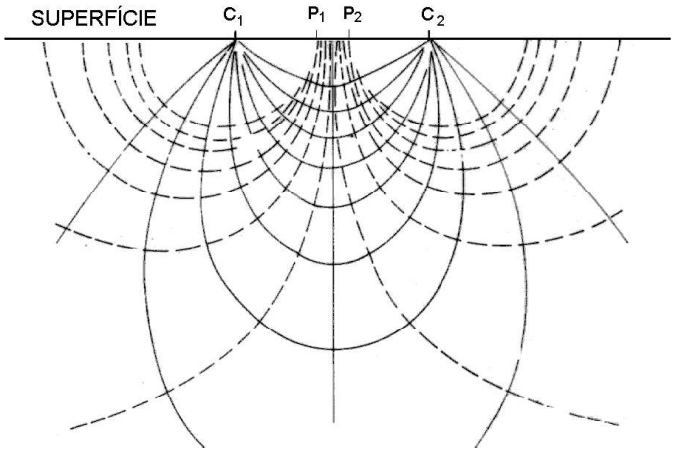


Figura 4 - Esquema da distribuição dos eletrodos no solo durante uma aquisição de eletrorresistividade. As linhas cheias indicam o fluxo de corrente no solo, ao passo que as linhas pontilhadas indicam as linhas de equipotenciais geradas pela corrente.

Obtendo-se a diferença de potencial e a corrente que flui no meio, a resistividade elétrica aparente do meio (Eq. 1) dependerá somente do fator geométrico (K). Este último é função da configuração dos eletrodos no terreno (Eq. 2).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \qquad \text{(Eq. 1)}$$

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} - \frac{1}{r_{C2P2}} \right)} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

onde, ρ_a é a resistividade elétrica aparente do meio; r_{C1P1}, r_{C2P1}, r_{C1P2} e r_{C2P2} são as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial.

No método da eletrorresistividade existem várias técnicas de levantamentos de campo, divididas basicamente em sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico, dentro das quais existe uma variedade de configurações possíveis de eletrodos que confere a técnica uma

grande versatilidade (Loke, 2004; Gallas, 2000). Normalmente, os ensaios de SEV são realizados quando se deseja uma informação pontual da resistividade em profundidade, ao passo que no caminhamento elétrico o objetivo é o estudo da variação lateral da resistividade (Telford *et al*., 1990).

O caminhamento elétrico possibilita o mapeamento lateral de resistividade elétrica, nesta técnica, o posicionamento dos eletrodos (potencial e corrente) pode ser realizado de diversas maneiras (arranjos Wenner, polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger e gradiente), dependendo do objetivo da investigação (Ward, 1990). Cada arranjo possui uma característica comum como resolução (dipolo-dipolo e polo-dipolo), profundidade de investigação (polo-polo) e razão sinal/ruído (Wenner e Wenner-Schlumberger).

Em aplicações para pesquisa ambiental, o arranjo dipolo-dipolo mostra-se mais efetivo entre os demais (Elis, 1998; Gallas, 2000). Neste arranjo, as fontes de corrente (transmissores) são distanciadas dos receptores em uma distância fixa para cada nível de investigação. Para aumentar a profundidade e o nível investigado, aumenta-se a distância (X) entre o transmissor e os receptores. As medidas são efetuadas em vários níveis de investigação (n), isto é, n = 1, 2, 3, 4, 3... é o ponto de intersecção entre uma linha que parte do centro dos eletrodos de corrente e outra que parte do centro dos eletrodos de potencial, com ângulos de 43˚ (Figura 5).

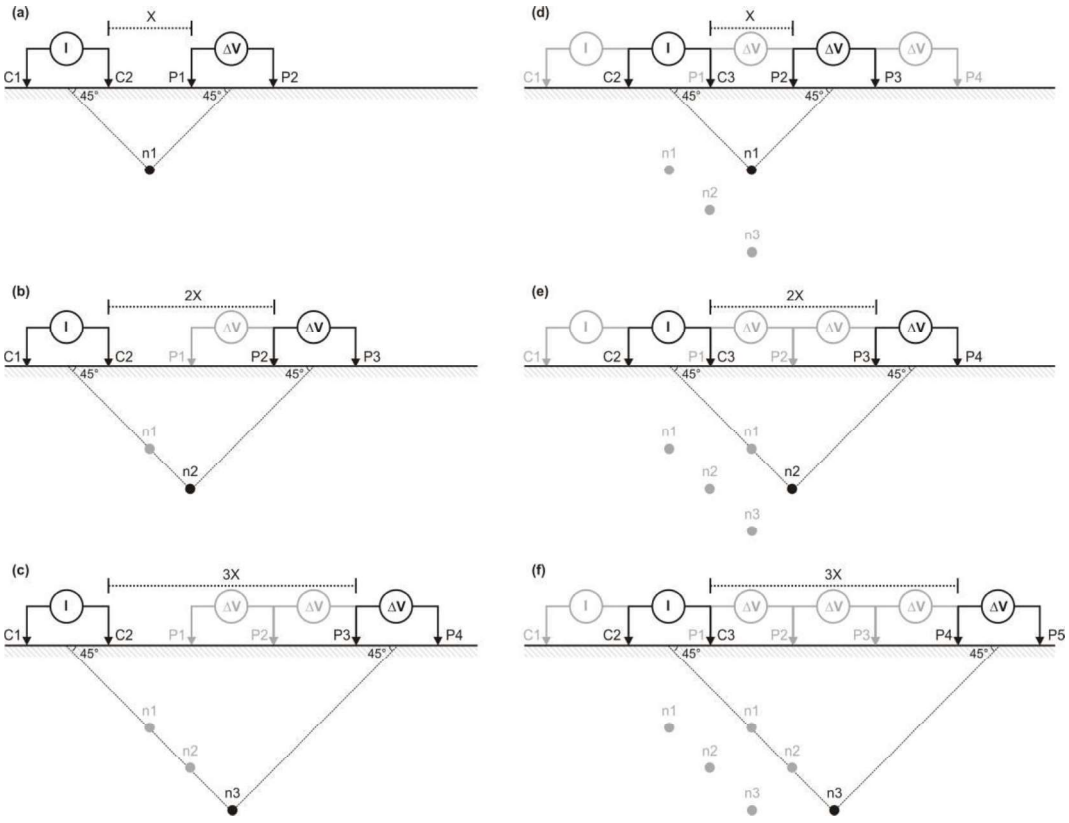


Figura 5 - Esquema sequencial de aquisição de dados utilizado em caminhamentos elétricos com o arranjo dipolo-dipolo (adaptada de Elis, 1998).

O resultado da aquisição é um conjunto de dados de resistividade elétrica obtido em n profundidades que formam uma pseudosseção (Elis, 1998). Esta por sua vez, reflete o comportamento do subsolo em resposta à passagem de correntes elétricas. Cada material geológico mostra um intervalo bem amplo de resistividade, que depende principalmente da composição mineralógica do meio, da quantidade de fluídos presentes nos poros dos materiais, e da salinidade destes fluídos.

2.2.2 Aquisição dos Dados

Os dados das seções geofísicas foram coletados a partir dos limites do lixão, uma vez que o trabalho de Cavalcanti (2013) já havia comprovado a presença da pluma até esta faixa. Linhas perpendiculares ao limite do Parque Nacional de Brasília (em direção a nordeste) foram levantadas com o propósito de se determinar os limites da pluma em direção a esta unidade de conservação ambiental. Outras seções foram realizadas no interior do Parque Nacional, em locais em que existem estradas de acesso. Uma linha, no interior do Parque Nacional, foi levantada de forma a se obter os valores de *background* em latossolos em faixa remota à influência do Lixão. Na porção a oeste foram realizados levantamentos em locais com viabilidade logística. Uma linha foi levantada na margem direta do Córrego Cabeceira do Valo, para obtenção de uma seção de *background* em gleissolo fora da influência do lixão.

Durante a execução dos levantamentos foi utilizado o equipamento Eletrorresistivímetro SYSCAL Pro 72 (*fabricado pela Iris Instruments*) que consiste em um módulo de aquisição interligado em cabos multieletrodos. Foram utilizados eletrodos metálicos para injetar corrente e medir o potencial elétrico gerado pelo fluxo de corrente no subsolo (Figura 6). O equipamento apresenta a melhor acurácia disponível igual a 0.2% e resolução de 1 microV, intervalo de temperatura entre -20ºC e +70ºC.

Na Tabela 1 estão listadas as coordenadas do início e do fim de cada seção levantada na área do Lixão e adjacências, onde foram executados 28 perfis de levantamentos geofísicos (sendo 15 de 240 metros de extensão e 13 de 360 metros, totalizando 8280 metros lineares de seções de tomografia elétrica).

Para a seleção do comprimento das seções foram consideradas as profundidades mínimas de investigação (pelo menos 50 metros) e questões logísticas como disponibilidade de área livre e superfícies não pavimentadas. Os arranjos de 240 e 360 metros permitiram investigar, respectivamente, 60 e 70 metros de profundidade.

2.2.3 Resultados

A Figura 7 mostra a localização das seções realizadas neste trabalho e nos principais trabalhos anteriores. No Apêndice 1 estão mostrados todos os resultados obtidos por inversão

dos dados de resistividade aparente em cada pseudosseção, mostrando a variação da resistividade com a profundidade. As cores foram fixadas para facilitar a comparação direta de seção a seção.

Figura 6 - Fotografias mostrando o equipamento Syscal em atividade de levantamento de campo.

NOME	UTM_X	UTM_Y	UTM_X	UTM_Y	Observação
	INÍCIO DA LINHA		FINAL DA LINHA		
LX-01	179973	8253845	179756	8254070	Perfis para verificar a compatibilidade dos resultados do levantamento de 2013 e a pertinência de utilizá-los para o mapeamento da pluma.
LX-02	180185	8253611	179959	8253855	
LX-03	180120	8254153	179768	8254061	Perfis para verificar o prolongamento da pluma para o interior do Parque Nacional de Brasília.
LX-04	180097	8253851	180130	8254196	
LX-05	179538	8254310	179777	8254050	Perfis para verificar a compatibilidade dos resultados do levantamento de 2013.
LX-06	179293	8254565	179573	8254268	
LX-07	180466	8255079	180366	8254733	Perfil para definição de *background* em Latossolo.
LX-08	179521	8253470	179246	8253609	Perfil para detectar contaminação em área urbana.
LX-09	179585	8254607	179443	8254414	Perfis para verificar a presença da pluma de chorume no interior do Parque Nacional de Brasília.
LX-10	180369	8253620	180144	8253864	
LX-11	179233	8254988	179063	8254821	
LX-12	178894	8255351	178737	8255176	
LX-13	821451	8255811	821303	8255627	
LX-14	180540	8253438	180375	8253615	
LX-15	821196	8252823	821199	8252578	Perfis para verificação do deslocamento da pluma em direção ao córrego Cabeceira do Valo
LX-16	821167	8253548	821217	8253308	
LX-17	821133	8253724	821179	8253487	
LX-18	821090	8253890	821147	8253665	
LX-19	821058	8254071	821104	8253838	
LX-20	180264	8252902	180099	8253074	Perfil para verificar a extensão da pluma ao sul da área.
LX-21	820973	8253289	821216	8253302	Verificação da pluma para sudoeste
LX-22	821271	8255654	821137	8255809	Perfis para verificação de eventual aumento da contaminação no extremo norte da área do lixão.
LX-23	821411	8255493	821281	8255645	
LX-24	180297	8254516	180138	8254214	Verificação do extremo nordeste da pluma no interior do Parque Nacional de Brasília
LX-25	180401	8254865	180298	8254521	
LX-26	179739	8254794	179591	8254592	
LX-27	820554	8254700	820320	8254696	Perfil para definição de *background* em Gleissolo.
LX-28	180433	8252721	180267	8252900	Perfil para verificar a extensão da pluma ao sul da área.

Tabela 1 - Localização dos perfis geofísicos efetivamente realizados com o reposicionamento das coordenadas das zonas anômalas relocadas em função dos resultados obtidos.

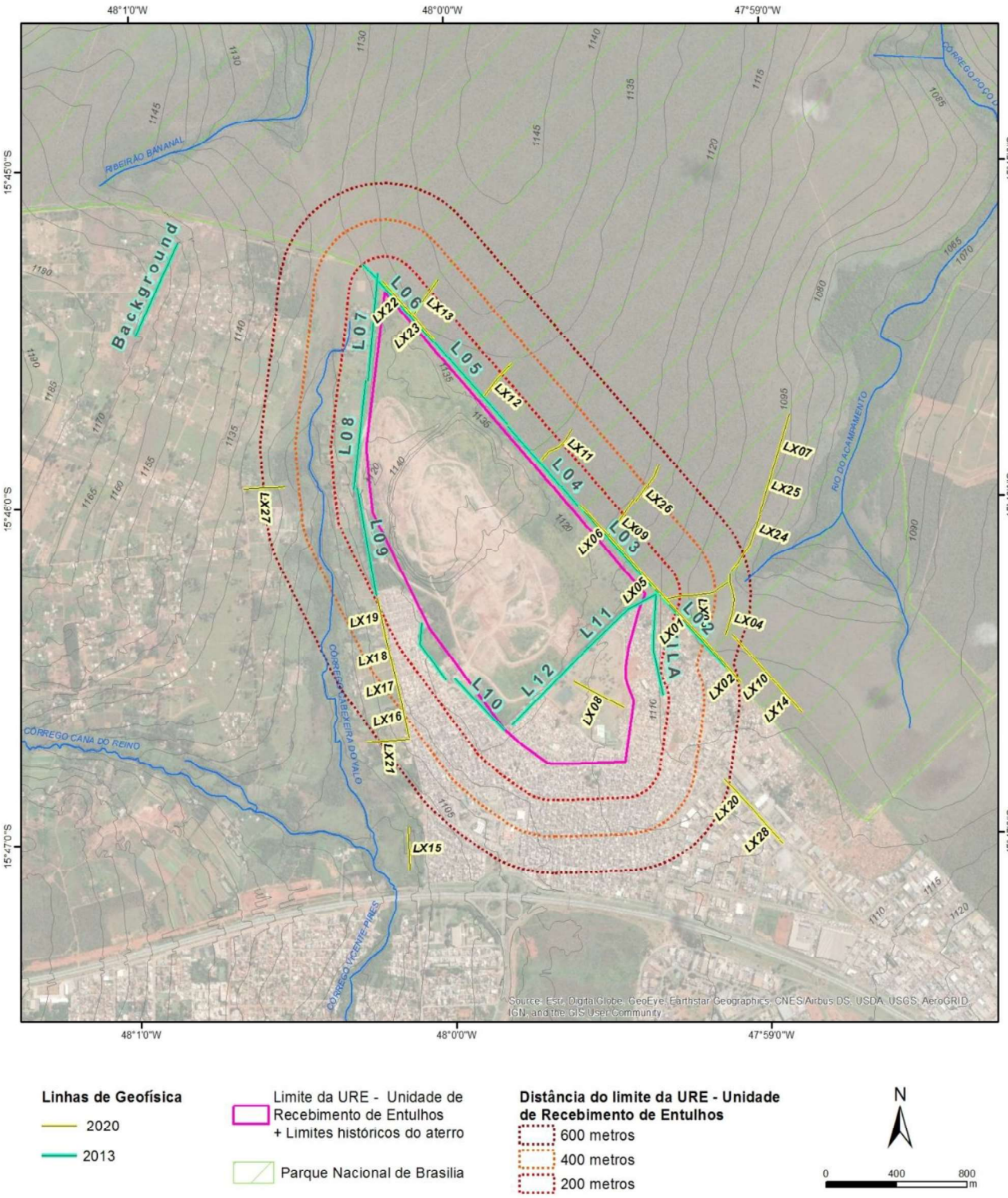


Figura 7- Localização das seções geofísicas levantadas neste trabalho e no ano de 2013 (Cavalcanti, 2013). As linhas pontilhadas se referem a *buffers* com faixas de 200 metros a partir dos limites da área que historicamente foi local de acumulação de resíduos.

2.2.4 Interpretação dos Resultados

Para a interpretação das seções geofísicas visando à determinação da presença de chorume em profundidade foram utilizados os seguintes critérios:

- Detecção de contaminação em poços de monitoramento anteriormente instalados (Stollberg & Weib, 2011 e Campos *et al*., 2006);

- Valores de *background* de resistividade elétrica em locais reconhecidamente sem influência de nenhum tipo de contaminação em profundidade (perfil "*background*" de Cavalcanti, 2013 e perfis 07 e 27 deste trabalho);
- Caminho do fluxo subterrâneo determinado pela rede de fluxo proposta por Carneiro (2002) e
- Premissa de que o chorume por ser rico em íons e outras substâncias dissolvidas deve modificar a resistividade da água nos poros dos materiais geológicos em que ocorre (rochas, saprolitos e solos).

A partir destes parâmetros foram aplicadas as seguintes diretrizes para a interpretação das linhas geofísicas:

- Áreas com valores de resistividades menores que 150 Ω/m representam locais com contaminação de elevada concentração (em geral em locais proximais ao aterro ou ao longo de canais de fluxo);
- Valores de resistividades entre 151 e 500 Ω/m representam áreas em que a contaminação ocorre com concentração moderada;
- Valores de resistividade entre 501 e 750 Ω/m indicam presença de contaminação de baixa concentração (chorume diluído);
- Valores de resistividade até 1000 Ω/m indicam algum tipo de contaminação, mesmo que de concentração extremamente baixa (mas ainda acima dos valores naturais de *backgound*);
- Para locais com a presença de Gleissolo com horizonte superficial rico em matéria orgânica admite-se que valores entre 500 e 700 Ω/m representam área não contaminadas. Os valores de resistividades mais reduzidas são vinculados à presença de matéria orgânica nos horizontes superficiais e à maior umidade em subsuperfície.

As linhas LX20 e LX28 apresentaram valores anômalos baixos de resistividade que podem representar contaminação por chorume. Entretanto, a observação do local mostra a presença de uma galeria de águas pluviais com lançamento clandestino de esgoto doméstico, o que levou a uma interpretação alternativa de que o aquífero esteja contaminado pelo efluente doméstico e não por chorume produzido por antigos aterros de resíduos sólidos. Esta interpretação é corroborada pela conformação do relevo local que não é favorável à infiltração de efluentes no sentido de NE para SW (nordeste para sudoeste). A confirmação desta interpretação foi possível após a construção dos poços de monitoramento, sendo que nesta área foi instalado o Poço LX19.

A Figura 8 traz o mapa dos limites da pluma de contaminação baseada nos resultados do estudo geofísico de superfície. Este mapa é considerado preliminar, pois se trata de uma interpretação apenas baseada em dados geofísicos, sem nenhum acesso direto à zona saturada do aquífero. Para a determinação de um mapa com maior segurança na interpretação e por consequência mais realista é necessário analisar os dados oriundos dos poços de monitoramento na região.

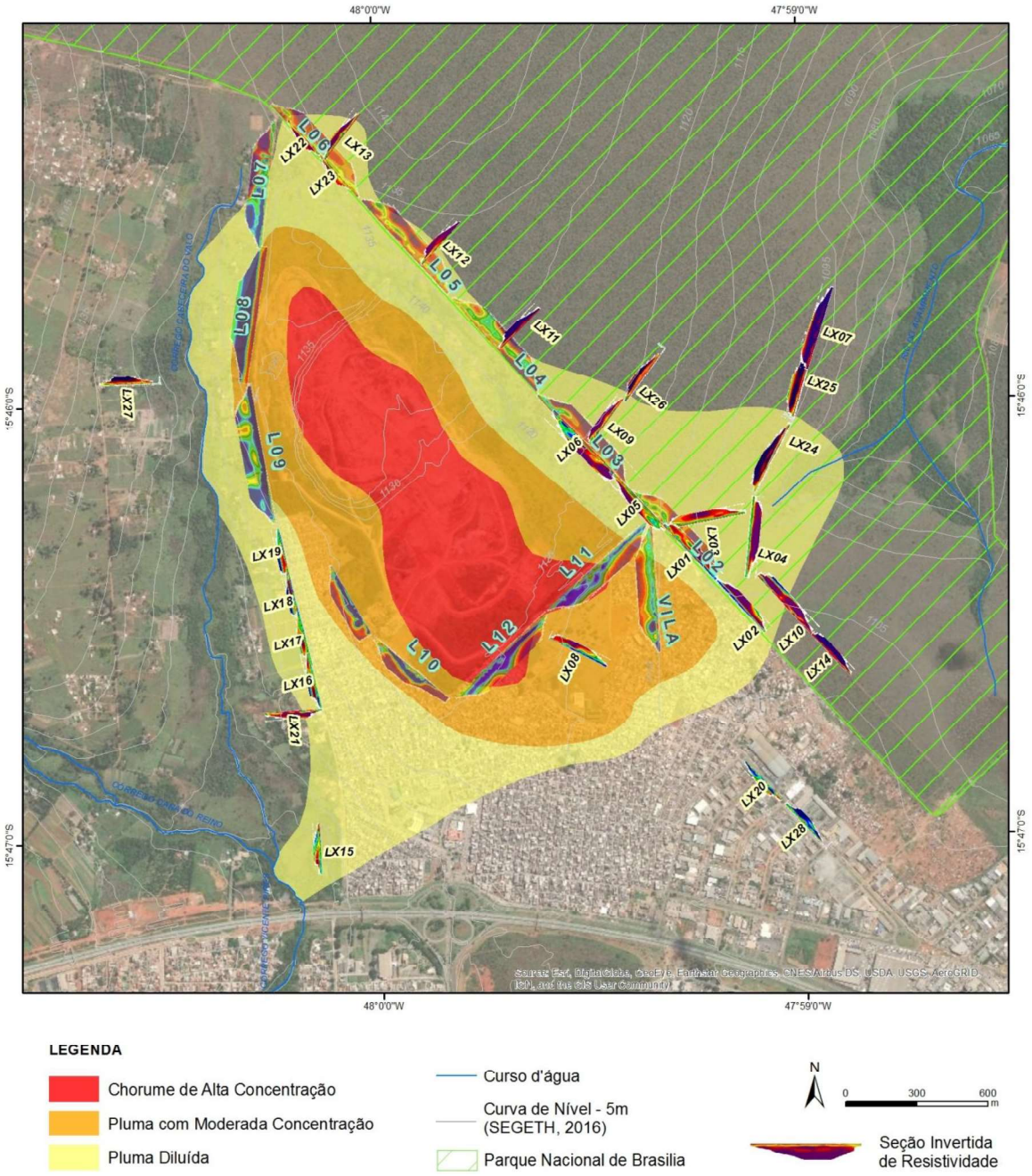


Figura 8 - Mapa preliminar da pluma de contaminação por chorume do antigo Lixão da Estrutural, baseado exclusivamente nos resultados do estudo geofísico, com inserção das seções geofísicas. Para melhor avaliação das seções individuais, observar as ilustrações em maior escala apresentadas nas seções da Figura 7. Mapa produzido a partir da integração dos dados geofísicos deste projeto, dados de Cavalcanti (2013), de Guedes (2019), dados do limite da pluma apresentados por Campos *et al*. (2006), além da confirmação da contaminação no poço da rede de monitoramento da ADASA.

2.3 Poços de Monitoramento

2.3.1 Construção dos Poços de Monitoramento

A locação dos pontos em que os poços de monitoramento foram instalados foi feita sobre uma base contendo os limites da pluma determinada pelo estudo geofísico, de forma a se confirmar os resultados deste estudo e para possibilitar a determinação da densidade, do conteúdo de substâncias dissolvidas, além das diferentes zonas de concentração da pluma. A imagem da Figura 9 traz a localização dos poços de monitoramento instalados.

Figura 9 - Localização geográfica dos poços de monitoramento das águas subterrâneas.

A proposta inicial previa a perfuração dos poços com uso do método roto-penumático com uso de compressor e martelo hidráulico, uma vez que este método é mais rápido. Entretanto no início da operação de perfuração do conduto do Poço 1 verificou-se que este método, apesar de rápido e eficiente em locais com solos rasos e rochas resistentes, não poderia ser aplicado ao terreno composto majoritariamente por ardósias alteradas recobertas por solos espessos. Desta forma, o método de perfuração foi alternado para o rotativo com circulação de lama (Figura 10). Neste caso, a retirada do material triturado do poço é feita por circulação reversa, isto é, a água entra pelo interior da seção hastes + broca e sai pelo espaço anelar entre as hastes + broca e a parede do poço, podendo ser recirculada ou descartada de acordo com sua densidade e a decisão do sondador. Para a descrição do material interceptado durante a perfuração, o Geólogo que acompanha a obra coleta amostras de calha (Figura 11) diretamente na entrada da caixa de lama.

Para a construção dos poços LX11, LX12, LX13 e LX14 foi necessário o uso do sistema roto-pneumático, pois a perfuração alcançou rocha classificada como quartzito grosso, coeso e silicificado (não passível de ser perfurada pelo método rotativo com circulação de lama).

A sequência construtiva dos poços de monitoramento seguiu o seguinte procedimento geral: perfuração do canal cilíndrico com a profundidade previamente determinada, instalação da seção revestimento-filtro (Figura 12), posicionamento do pré-filtro (Figura 13), posicionamento de eventuais seções de selos de bentonita, concretagem da porção superior do poço e instalação do sistema de acabamento e proteção. Os poços foram perfurados com diâmetro de 6 a 7 polegadas e revestidos com PVC Geomecânico ranhurado. Na base da seção dos tubos de revestimento-filtro foi utilizado um *cap* rosqueável.

O acabamento e sistema de proteção do poço contam com: um *cap* rosqueável diretamente no tubo de PVC de 4 polegadas, um tubo de aço carbono de seis polegadas em sua parte externa (dotado de um cadeado de 40 mm protegido por chapa de aço galvanizado), além de uma manilha de concreto com 60 cm de diâmetro dotada de tampa, também em concreto (Figura 14). Os poços situados em área urbana ainda contam com uma cerca de arame farpado com 7 fios e cadeado de proteção (Figura 15).

Os poços tiveram profundidades variáveis de 14, 24, 30, 50 ou 70 metros em função da sua localização, objetivo de instalação e da profundidade do nível freático local. A Tabela 2 traz as principais características dos poços de monitoramento instalados no âmbito do presente trabalho e o Apêndice 2 traz os detalhes construtivos, incluindo descrição da seção pedológica / litológica, seção de instalação dos filtros, acabamento e demais aspectos construtivos dos poços.

O isolamento sanitário da porção rasa dos poços varia de 4 a 6 metros de concreto no espaço anelar entre o revestimento e o conduto. Este selo tem como objetivo evitar a contaminação direta pelo escoamento superficial de efluentes.

Figura 10 - Perfuração do poço LX14, mostrando a torre com sistema hidráulico, as hastes metálicas e a caixa de circulação de lama. O caminhão pipa situado ao lado da torre do sistema hidráulica fornece água para circulação no interior do conduto.

Figura 11 - Amostra de calha coletada na entrada da caixa de lama durante a perfuração do poço LX 12. Notar que se trata de areia grossa com grãos esféricos típicos dos observados no topo da Formação Ribeirão Piçarrão do Grupo Paranoá.

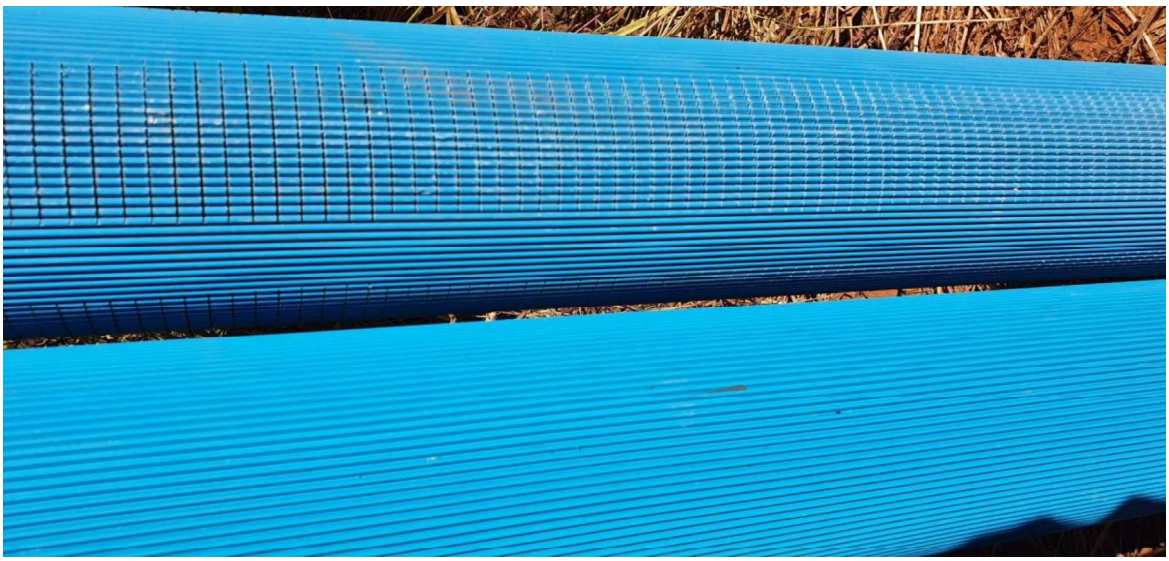


Figura 12 - Detalhes dos tubos de PVC Geomecânico de 4 polegadas utilizados na coluna de revestimento e filtro nos poços de monitoramento instalados pelo presente estudo.

Figura 13 - Detalhe do pré-filtro utilizado na maior parte dos poços.

Figura 14 - Sistema de proteção triplo, composto por *cap* de PVC rosqueável, tubo de aço carbono com tampa e cadeado e manilha em concreto com tampa.

Figura 15 - Cerca de proteção de poços instalados na área urbana da Cidade Estrutural.

Poço	Coordenadas		Zona	Prof. (m)	NE (m)	Seção de filtros (intervalos)	Formação Geológica
	UTM E	UTM N					
LX-1	180389	8253605	23L	24,0	5,11	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-2	180141	8253872	23L	24,0	3,07	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-3	180386	8254801	23L	24,0	8,38	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-3A	180457	8255053	23L	14,0	8,15	4,0 (10 a 6)	Ribeirão do Torto
LX-4	180163	8254225	23L	24,0	1,77	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-4A	180138	8254152	23L	14,0	1,16	4,0 (10 a 6)	Ribeirão do Torto
LX-5	180011	8254147	23L	24,0	3,65	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-6	179728	8254098	23L	60,0	6,17	14,0 (42 a 38, 30 a 24 e 16 a 12)	Ribeirão do Torto
LX-7	179498	8254300	23L	30,0	12,55	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-8	178739	8255129	23L	30,0	13,77	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-9	821274	8255631	22L	30,0	11,66	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-10	821112	8255865	22L	24,0	8,84	6,0 (20 a 16 e 10 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-11	821042	8255351	22L	14,0	8,84	4,0 (10 a 6)	Ribeirão Piçarrão
LX-12	820971	8254813	22L	30,0	7,63	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-13	821052	8254156	22L	30,0	8,00	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-14	821105	8253742	22L	20,0	9,6	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão Piçarrão
LX-15	821298	8252893	22L	30,0	8,20	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-16	821206	8253347	22L	24,0	8,99	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-17	178835	8253354	23L	50,0	14,20	14,0 (42 a 38, 30 a 24 e 16 a 12)	Ribeirão do Torto
LX-18	179507	8253233	23L	30,0	7,74	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto
LX-19	180073	8253164	23L	30,0	5,30	8,0 (20 a 16 e 12 a 8)	Ribeirão do Torto

Tabela 2 - Localização e principais características construtivas dos poços de monitoramento instalados nas adjacências do maciço de aterro (incluindo Parque Nacional de Brasília, limites externos do Lixão e área urbana da cidade Estrutural). NE medidos nos dias 04 e 05/08/20 (e dia 22/08/20 LX16 e LX18).

A rede de monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos é composta pelos poços instalados pelo presente projeto, além de um poço instalado em projeto de pesquisa anterior (Abreu 2001) denominado Poço LX-20, de mais 5 poços instalados pelo Projeto CEB/Finatec denominados poço: PCX1 e PCX2 (situados na crista do maciço de lixo), PX Moinho, PX Entrada e PX Norte, além do Poço 18 da rede de monitoramento da Adasa. Portanto, a rede de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas associada à área do maciço de lixo e adjacências é composta por 27 pontos de acesso direto à zona saturada do aquífero freático local.

A maior parte dos poços objetiva ao monitoramento e avaliação do aquífero freático local associado ao Sistema Intergranular P1, contudo, os poços LX-6 e LX-17 permitem acesso ao aquífero fraturado do Subsistema A e os poços LX11, LX12, LX13 e LX-14 permitem acesso ao Subsistema S/A ambos do Sistema Paranoá.

A rede de monitoramento das águas subterrâneas deverá ser aplicada para monitoramento da qualidade das águas (ou alternativamente da pluma de contaminação) e da variação dos níveis freáticos, sendo desta forma uma rede para monitoramento quali-quantitativo das águas subterrâneas.

2.3.2 Métodos Analíticos e Procedimentos de Coleta de Amostras

Para a realização das análises das substâncias consideradas no presente estudo foram utilizados / aplicados os seguintes métodos analíticos:

- Determinação de metais totais, solúveis/dissolvidos por espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplada (ICP-OES), com os seguintes Limites de Quantificação (LQ): Antimônio 1 µg/L; Arsênio 1 µg/L; Bário 10 µg/L; Cádmio 1 µg/L; Cálcio 0,1 mg/L; Chumbo 10 µg/L; Cobalto 10 µg/L; Cobre 1 µg/L; Crômio 10 µg/L; Magnésio 0,1 mg/L; Mercúrio 0,1 µg/L; Níquel 10 µg/L; Sódio 0,2 mg/L e Zinco 10 µg/L;
- Determinação de Cloreto Total Nitrato (como N) por espectrofotometria com LQ = 0,1 mg/L;
- Determinação de Nitrato (como N) por espectrofotometria com LQ = 0,23 mg/L;
- Determinação de Nitrito (como N) por espectrofotometria com LQ = 0,015 mg/L;
- Determinação de Amônia (como NH_3) e Amônio por espectrofotometria com LQ = 0,015 mg/L;
- Determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO) por espectrofotometria com LQ = 3 mg/L.

As análises foram realizadas no Laboratório Tommasi Ambiental, filial de Brasília, situado em Taguatinga, Distrito Federal. As amostras foram coletadas pelos técnicos responsáveis pelo presente estudo, seguindo as melhores práticas para se evitar qualquer tipo de contaminação durante a amostragem (uso de luvas, limpeza prévia das sondas de leituras *in situ*, identificação dos fracos fornecidos pelo laboratório, dentre outras práticas).

Todas as coletas de amostras foram realizadas com auxílio de um amostrador tipo "*bailer*". Para a coleta de amostras a diferentes profundidades de forma a ser verificar a possibilidade de estratificação da pluma de contaminação foram acoplados pesos no *bailer* para que este possa submergir no interior da coluna de água do poço e amostrar águas nas zonas dos filtros (Figura 16).

No ato da coleta são realizadas medidas de parâmetros físico-químicos denominadas análises *in situ*, que incluem a temperatura da amostra, seu pH e a condutividade elétrica, com auxílio de equipamentos portáteis multiparâmetro dotado de sondas específicas (Figura 17).

Após coleta, as amostras foram preservadas em caixa de isopor com gelo para manutenção da temperatura abaixo de 20º C.

2.3.3 Resultados das Análises Químicas

A Tabela 3 traz os resultados de análises químicas e parâmetros físico-químicos de amostras de águas subterrâneas coletadas em poços de monitoramento situados sobre o maciço de resíduos e em suas adjacências (incluindo área do Parque Nacional de Brasília e área urbana da Cidade Estrutural).

Figura 16 - Amostragem de água no poço LX3 situado no Parque Nacional de Brasília. Notar o detalhe dos pesos acoplados no corpo do *bailer*. A água se apresenta turva, pois a obra do poço havia sido recém-concluída.

Figura 17 - Sonda multiparâmetro YSI Professional Plus e sonda HQ 40d da Hach Instruments, utilizadas para coleta dos parâmetros (pH, temperatura, total de sólidos dissolvidos (TDS), e condutividade elétrica (CE).

Poço-Amostra Parâmetro	LX2-01	LX3A-01	LX4A-01	LX5-01	LX6-01	LX7-01	LX7A-01	LX8-01	LX9-01	LX10-01	LX11-01
Prof. Amostragem	10,0	10,0	10,0	15,0	20,0	20,0	8,5	20,0	20,0	18,0	12,0
Cond. Elétrica.	300	35	88,3	302,4	143,1	210	2.330	156	169	226	3.640
Temp.	22,6	22,3	23,1	23,2	23,3	22,8	23,8	23,4	22,5	23,5	23,5
pH	11,8	6,7	6,9	8,3	7,5	8,4	8,1	8,4	8,8	8,64	12,9
Amônia	< LQ	< LQ	< LQ	1,2	0,5	1,8	121,5	0,5	< LQ	< LQ	28,7
Nitrito	0,604	< LQ	0,014	0,3	0,009	0,004	1,108	0,350	0,088	0,159	0,289
Nitrato	3,6	0,3	< LQ	0,6	0,7	3,2	15,2	1,9	0,90	0,90	2,6
Cloreto	7,9	7,6	1,1	18,0	10,5	8,5	261,0	26,8	9,9	13,6	388,0
Sulfato	3,0	< LQ	2,0	2,0	4,0	6,0	26,0	4,0	4,0	2,0	8,0
DQO	< LQ	< LQ	< LQ	8,0	< LQ	20,0	1.260	16,0	16,0	< LQ	108,0
Antimônio	< LQ	< LQ	< LQ	0,0054	< LQ	0,0058	< LQ	0,0057	0,004	< LQ	< LQ
Arsênio	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Bário	0,09	0,03	< LQ	0,078	0,0195	0,119	0,086	0,066	0,027	0,035	0,401
Cádmio	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,035	< LQ
Chumbo	0,034	< LQ	0,0442	0,05	< LQ	0,041	< LQ	0,114	0,088	0,033	0,014
Cobalto	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cobre	0,0029	< LQ	< LQ	0,0023	< LQ	0,0059	O,0064	0,0037	< LQ	0,0011	0,021
Crômio	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,047
Mercúrio	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Níquel	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,010	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,018
Zinco	0,299	0,074	0,0559	0,279	0,0364	0,589	0,096	0,392	0,069	0,049	0,336
Cálcio	83,19	3,97	7,98	26,26	10,7	52,32	43,07	21,97	16,6	25,37	342,36
Magnésio	5,76	0,654	0,826	12,87	0,719	24,38	9,77	7,79	6,63	12,3	31,9
Sódio	27,01	0,718	3,73	36,87	3,25	40,91	136,13	48,6	44,94	46,64	69,57

Poço-Amostra Parâmetro	LX12-01	LX13-01	LX14-01	LX15-01	LX19-01	LX20-01	CH1-01
Prof. Amostragem	15,0	15,0	20,0	15,0	15,0	2,5	3,0
Cond. Elétrica.	4.640	1.532	227,0	198,4	176,0	44,3	5.990
Temp.	26,8	23,3	23,7	23,3	22,3	23,4	29,5
pH	7,9	7,6	8,3	7,6	9,2	5,56	7,77
Amônia	280,0	47,0	< LQ	< LQ	2,0	2,90	402,0
Nitrito	0,019	0,404	0,250	0,017	0,051	< LQ	< LQ
Nitrato	0,6	20,20	0,5	10,30	1,70	0,7	< LQ
Cloreto	508,0	198,0	63,5	12,5	11,6	5,6	655,0
Sulfato	126	< LQ	< LQ	< LQ	8,0	< LQ	< LQ
DQO	204,0	34,0	3,0	11,0	8,0	< LQ	1.260
Antimônio	< LQ	0,0029	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Arsênio	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Bário	0,079	0,163	0,186	0,0304	0,014	< LQ	0,236
Cádmio	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Chumbo	0,016	0,038	0,289	< LQ	0,133	< LQ	< LQ
Cobalto	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cobre	0,0028	0,0012	0,0532	< LQ	0,0014	0,0069	< LQ
Crômio	< LQ	< LQ	0,116	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Mercúrio	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Níquel	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,017
Zinco	0,045	0,056	0,111	0,0509	0,082	0,050	0,037
Cálcio	26,98	64,55	34,4	17,4	10,06	0,37	106,67
Magnésio	31,79	28,98	2,83	0,59	2,40	0,19	107,32
Sódio	298,27	98,33	8,62	11,7	37,38	9,07	367,36

Tabela 3 - Dados de análises de amostras coletadas em poços de monitoramento sobre o lixão e adjacências. Profundidade de amostragem em metros; Condutividade elétrica em µS/cm; Temperatura em ^{o}C; demais substâncias em mg/L. LQ - limite de quantificação do método analítico.

Os resultados das análises já disponibilizadas mostram uma grande variação da condutividade elétrica da água subterrânea na poligonal estudada, e indicam que os dados hidroquímicos corroboram integralmente com os dados geofísicos evidenciando que todos os poços instalados confirmam a presença da pluma de contaminação em profundidade.

O uso dos resultados de condutividade elétrica (CE) do fluido (água ou efluente) é indicado, pois este parâmetro é diretamente proporcional a todas as substâncias presentes na zona amostrada do aquífero. Alternativamente podem-se utilizar dados de totais de sólidos dissolvidos (TSD ou TDS na sigla em inglês). A partir dos dados de CE é possível separar as zonas de contaminação em três zonas contrastantes:

- Zona de máxima concentração correspondente à porção de geração do chorume pela decomposição dos resíduos. Esta região é fortemente vinculada ao maciço de lixo e suas adjacências, mas pode ser ampliada em função de variações das propriedades dos aquíferos (ex.: presença de valores anômalos de condutividade hidráulica, ou aumento do gradiente hidráulico pela elevação da pilha de resíduos). Nesta zona as concentrações são superiores a 1000 µS/cm, chegando ao valor de 17.800 µS/cm no ponto ao norte do lixão;
- Zona de espalhamento corresponde à região marginal do lixão que pode alcançar até mais 500 metros para a direção sudoeste, sendo definida por valores de condutividade elétrica variáveis de 1000 a 200 µS/cm;
- Zona de diluição corresponde à borda externa da pluma a qual apresenta valores menores que 200 µS/cm, contudo sempre mais elevados que os valores de *background* para águas freáticas dos aquíferos do Distrito Federal (associados a latossolos). Esta zona pode alcançar de forma comprovada até mais de 1 km em direção a sudoeste do lixão mais recente ou cerca de 600 metros a sudoeste de aterros considerados antigos.

Os valores dos metais de transição (metais com peso atômico elevado) nas diferentes posições com relação à pluma de contaminação são relativamente baixos. Este fato não é exclusivo do Lixão da Estrutural, mas observado em outros extratos de resíduos como os observados nos Estados Unidos (em Du Page, Ilinois e na média dos aterros do estado de Wisconsin; Fetter, 1994) (Tabela 4). A relativa baixa concentração de metais nos diferentes tipos de chorume é atribuída à origem dos resíduos, que são dominante ou exclusivamente relacionados a lixo doméstico em que o volume de resíduos orgânicos domina e as fontes para disponibilização de metais é restrita (grande parcela é retirada para reciclagem antes de se incorporar ao aterro) (Fetter *et al*., 2018).

O pH apresenta ampla variação podendo alterar de ácidos até fortemente alcalinos, em função do tempo de operação do aterro, do tempo de geração do chorume e do clima da região em que os resíduos estão aterrados.

Substâncias Selecionadas	Du Page, Ilinois, EUA	Wisconsin, EUA (média)
Condutividade Elétrica	10.200	408,8 - 35.301
pH	6,9	5 - 8,9
Amônia	862	26 - 557
Nitrito	-	0 - 0,11
Nitrato	-	0 - 1,4
Cloreto	3.484	2 - 2651
Sulfato	< 0,10	8,4 - 500
DQO	1.340	1.120 - 50.450
Antimônio	-	0 - 3,19
Arsênio	0,11	0 - 0,225
Bário	-	0 - 5,0
Cádmio	1,95	0 - 0,07
Chumbo	4,46	0 - 1,11
Cobre	< 0,10	0,32
Crômio	< 0,10	> LQ
Mercúrio	0,0008	0 - 0,01
Níquel	0,3	0 - 1,65
Zinco	18,8	0 - 54
Cálcio	46,8	200 - 2100
Magnésio	233	120 - 780
Sódio	748	12 - 1630
Potássio	501	0 - 1.375
Manganês	< 0,1	0,03 - 25,9
Ferro	4,2	2,1 - 1.400

Tabela 4 - Concentrações de substâncias selecionadas medidas em aterros de resíduos urbanos na cidade de Du Page, Ilinois, EUA e valores mínimos em máximos encontrados em aterros do estado de Wisconsin, EUA. Condutividade elétrica em μΩ/cm e demais substâncias em mg/L (Fetter, 1994).

No caso do Lixão da Estrutural os principais indicadores da presença e concentração do chorume em profundidade são a condutividade elétrica, pH, amônia, cloreto, DQO, cálcio, magnésio e sódio. O pH é fortemente alcalino nas zonas de produção do chorume e tende a diminuir a alcalinidade quando há diluição com águas de recarga. O aquífero freático, sem qualquer contato com o extrato dos resíduos varia de ácido a levemente ácido.

O par sódio e cloreto em associação com amônia, cálcio e magnésio são poderosos indicadores da presença de águas subterrâneas contaminadas por chorume. A origem do sódio e do cloreto é atribuída a alimentos processados (restos de comida) que são levados em grandes volumes ao aterro. A amônia também é associada à decomposição de alimentos, e uma vez que o ambiente do aterro é fortemente redutor o nitrogênio permanece na forma de amônia (NH_4) e não oxida para nitrito e nitrato como é comum nos ambientes subterrâneos com condições Redox positivas, isto é ambiente oxidante. O cálcio e o magnésio são considerados como oriundos da dissolução de concreto encontrado em grande volume no aterro, associado a escombros de demolição e restos de obras.

2.3.4 Mapa da Extensão da Pluma de Contaminação

A Figura 18 apresenta o mapa da pluma de contaminação por percolados líquidos do antigo Lixão da Estrutural, tendo sido integrado a partir dos resultados do estudo geofísico com os dados de análises de águas coletadas nos poços de monitoramento e em poços existentes na região do Lixão da Estrutural e adjacências.

A distribuição da pluma foi representada a partir da condutividade elétrica (em µS/cm) do fluido amostrado de cada ponto com acesso direto à zona saturada do aquífero freático. Este parâmetro é o mais adequado para a determinação da densidade e concentração do contaminante, uma vez que representa todas as espécies iônicas dissolvidas na água. Também apresenta relação direta entre as zonas de produção do chorume e as zonas de espalhamento e diluição. O mapa foi classificado em 8 classes discriminadas por cores, incluindo as seguintes concentrações de contaminantes ou condutividades elétricas: < 35, entre 35 e 50, entre 50 e 500, entre 500 e 950, entre 950 e 1.300, entre 1,300 e 4.500, entre 4.500 e 10.000 e maior que 10.000 µS/cm. A opção pelo uso de intervalos não regulares se deve às relações de áreas de interpolação das diferentes classes.

O método do "Vizinho mais Próximo" foi adotado para operação de interpolação, pois os dados apresentam contrastes, além da baixa densidade do banco de dados hidroquímicos, contudo boa distribuição espacial.

As áreas destacadas em vermelho (tons mais escuro e claro) representam a zona de produção da pluma de chorume (imediatamente abaixo da principal zona de acumulação de resíduos), o que representa concentração de chorume muito elevada, com condutividades elétricas do fluido maiores que 4.500 µS/cm (alcançando 14.700 µS/cm em um poço de monitoramento instalado na porção norte do maciço de resíduos).

A faixa destacada em tons de cor laranja (claro e escuro) e amarelo representa a zona de distribuição do contaminante, com concentração moderada à alta com condutividades elétricas do fluido entre 4.500 e 500 µS/cm. Esta classe inclui uma estreita faixa destacada em amarelo que representa a passagem da zona de mistura da pluma de maior concentração com águas de recarga natural.

A poligonal externa delimitada nas cores em tons de limão e verde representa a zona de dispersão da pluma de contaminação, o que na prática indica pluma diluída marcada por condutividades elétricas entre 35 e 500 µS/cm. A área com valores entre 35 e 50 µS/cm é bastante expressiva e marca a grande capacidade de depuração natural da pluma por águas de recarga.

A área restrita de cor verde em tom mais escuro, apenas situada no Parque Nacional de Brasília, apresenta valor de condutividade elétrica inferior a 35 µS/cm o que é considerado o background do aquífero freático regional.

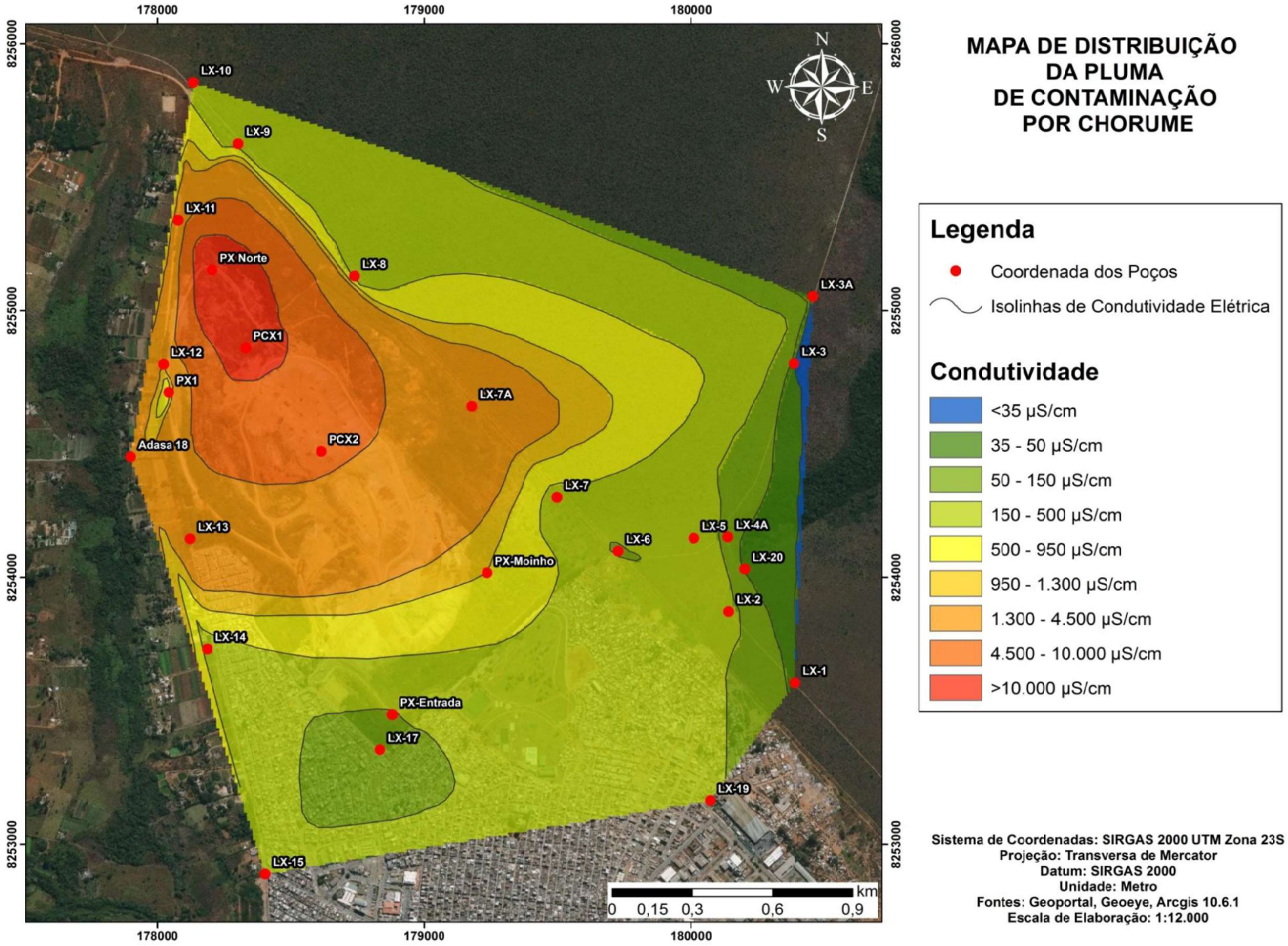


Figura 18 - Distribuição da pluma de contaminação por chorume baseada na condutividade elétrica do fluído (medição realizada em agosto e 2020).

3. MAPA POTENCIOMÉTRICO

3.1 Método de Interpolação

Um conjunto de 25 pontos foi utilizado para a confecção do mapa potenciométrico e consequente determinação da direção e sentido do fluxo subterrâneo. Este banco de dados (Tabela 4) é composto por 19 poços instalados pelo presente estudo, mais 5 poços instalados pelo projeto CEB / Finatec, um poço de bombeamento e recirculação de chorume (operado pelo Serviço de Limpeza Urbana - SLU) e um poço operado pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (poço Raso número 18 da rede de monitoramento das águas subterrâneas da ADASA).

PONTO	POÇO	Coordenadas		Cota Terreno	HBT	CE (µS/cm)	NE (m)
		UTM E	UTM N				
1	**LX-1**	180389	8253605	1105,37	0,45	35,8	5,11
2	**LX-2**	180141	8253872	1102,81	0,62	182,0	3,07
3	**LX-3**	180386	8254801	1096,94	0,45	35,4	8,38
4	**LX-3A**	180457	8255053	1095,83	0,37	35,0	8,15
5	**LX-4A**	180138	8254152	1097,38	0,42	60,0	1,16
6	**LX-5**	180011	8254147	1102,23	0,59	332	3,65
7	**LX-6**	179728	8254098	1108,91	0,35	118,2	6,17
8	**LX-7**	179498	8254300	1116,22	0,39	258,0	12,55
9	**LX-8**	178739	8255129	1130,21	0,24	203	13,77
10	**LX-9**	821274	8255631	1134,97	0,55	216	11,66
11	**LX-10**	821112	8255865	1132,30	0,34	237	8,84
12	**LX-11**	821042	8255351	1128,75	0,34	2.140	8,84
13	**LX-12**	820971	8254813	1121,48	0,36	1.281	7,63
14	**LX-13**	821052	8254156	1115,61	0,34	2.260	8,00
15	**LX-14**	821105	8253742	1114,45	0,26	227	9,6
16	**LX-15**	821298	8252893	1100,82	0,32	198,4	8,20
17	**LX-17**	178835	8253354	1120,90	zero	60,0	14,7
18	**LX-19**	180073	8253164	1110,65	0,32	176,0	5,30
19	**LX-20**	180201	8254031	1097,84	0,31	44,3	2,20
20	**LX-7A**	179178	8254641	1128,20	zero	2.420	7,95
21	**PX Moinho**	179236	8254017	1127,02	zero	959,0	13,40
22	**PX Entrada**	178881	823486	1122,71	0,60	127,5	17,24
23	**PX Norte**	821163	8255161	1136,78	0,03	17.800	21,07
24	**PX1**	820988	8254707	1120,18	zero	361,0	9,95
25	**PCX1**	821281	8254866	1143,99	0,70	14.090	21,03

Tabela 4 - Banco de dados utilizado para a confecção do mapa potenciométrico da área estudada. Cota do terreno com referência ao nível do mar; HBT - elevação da boca do poço ao nível do terreno, CE - condutividade elétrica do fluido e NE - nível estático.

A determinação do georreferenciamento foi feito com auxílio de GPS portátil sobre cada ponto e a cota foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação com uso de imagens de grande

resolução espacial (com possibilidade de ampliação até 1:12.500), sendo que os valores obtidos foram comparados com os obtidos por GPS barométrico em campo (com erro de 50 cm na elevação).

A carga potenciométrica em cada ponto foi obtida pela subtração da cota em cada ponto menos a medida do nível estático - NE de cada poço menos a elevação da boca do poço até o nível do terreno. Após a consolidação dos dados a interpolação foi realizada com auxílio do software ArcGis 9.4 da ESRI, com uso do interpolador definido como "Vizinho mais Próximo". Como a maior parte da área apresenta pequeno desnível optou-se por aplicar as isolinhas de carga potenciométrica (isopiezas) a cada 2 metros.

O banco de dados permitiu confeccionar três produtos cartográficos: Mapa de Carga Potenciométrica Natural (considerando a área sem a acumulação de resíduos sólidos), Mapa Potenciométrico Atual (que inclui as mudanças topográficas devidas ao acúmulo dos resíduos) e Mapa da Espessura da Zona Não Saturada do Aquífero Freático. Na produção cartográfica digital optou-se pela representação dos mapas apenas no interior das áreas limitada pela presença de dados (poços), uma vez que fora desta região não há dados disponíveis.

O mapa da Figura 19 mostra o Mapa Potenciométrico Natural, com linhas equipotenciais a cada 2 metros dentro da área delimitada pelos poços de monitoramento existentes.

O mapa da Figura 20 mostra o Mapa Potenciométrico Atual. A comparação dos dois mapas potenciométricos mostra que o divisor das bacias hidrogeológicas foi transferido para sudoeste em cerca de 500 metros de distância, sendo que naturalmente era posicionado próximo à cerca limítrofe com o Parque Nacional de Brasília, passando atualmente para a zona da crista central do maciço de resíduos.

O mapa da Figura 21 mostra o mapa da espessura da zona não saturada para o mês de agosto de 2020. A partir do monitoramento do nível estático dos poços outros mapas deverão ser produzidos para verificação do comportamento da variação da espessura da zona não saturada, principalmente na zona principal de acúmulo de resíduos. Prevê-se a confecção de mapas potenciométricos e de espessura da zona não saturada, no mínimo para os meses de dezembro, janeiro e abril, quando será possível avaliar um ciclo completo de nível mínimo e máximo. Os níveis mínimo e máximo estão previstos, de forma preliminar, para ocorrer respectivamente nos meses dezembro e abril. Estes dados serão fundamentais para avaliar o volume anual de recarga, tanto na área do aterro de resíduos, quanto em áreas urbanas (na Cidade Estrutural) e naturais (no Parque Nacional de Brasília). A recarga por águas naturais de precipitação representa o principal fator de atenuação da carga contaminante por chorume, quando se distancia da zona principal de acumulação de resíduos.

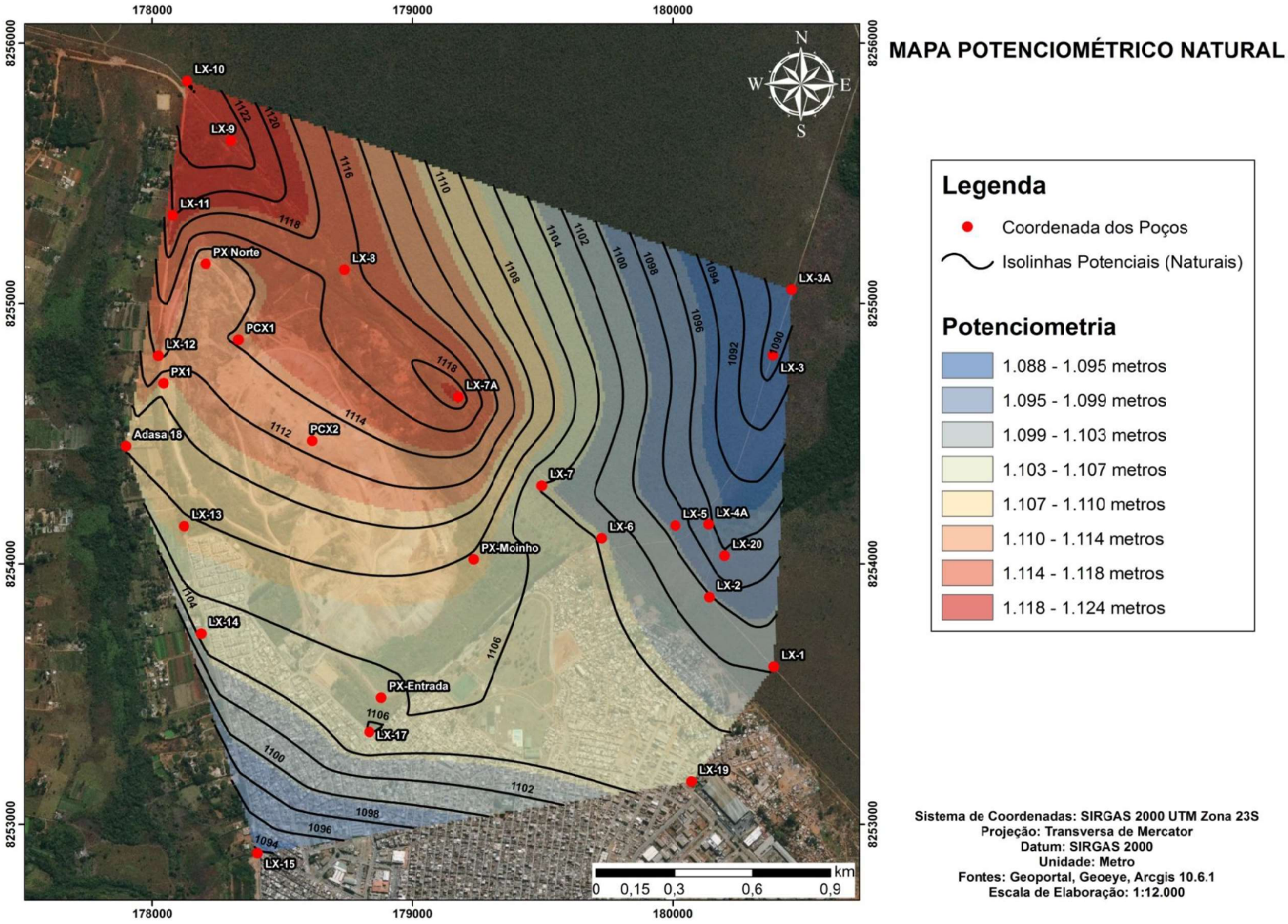


Figura 19 - Potenciometria com base no relevo antes da acumulação dos resíduos na área.

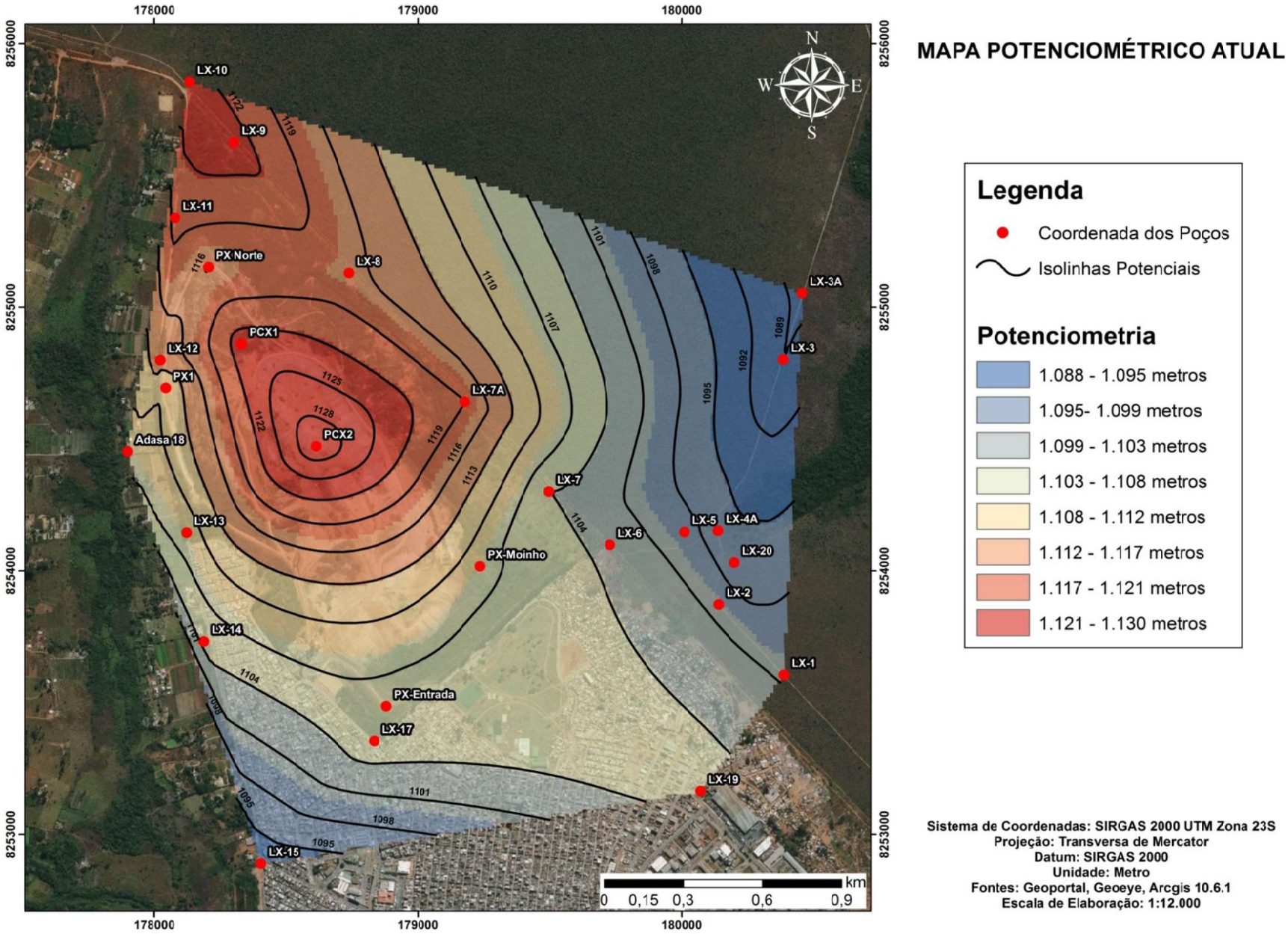


Figura 20 - Potenciometria com base no relevo atual (pós-acumulação dos resíduos na área). Medidas de níveis realizadas em agosto de 2020.

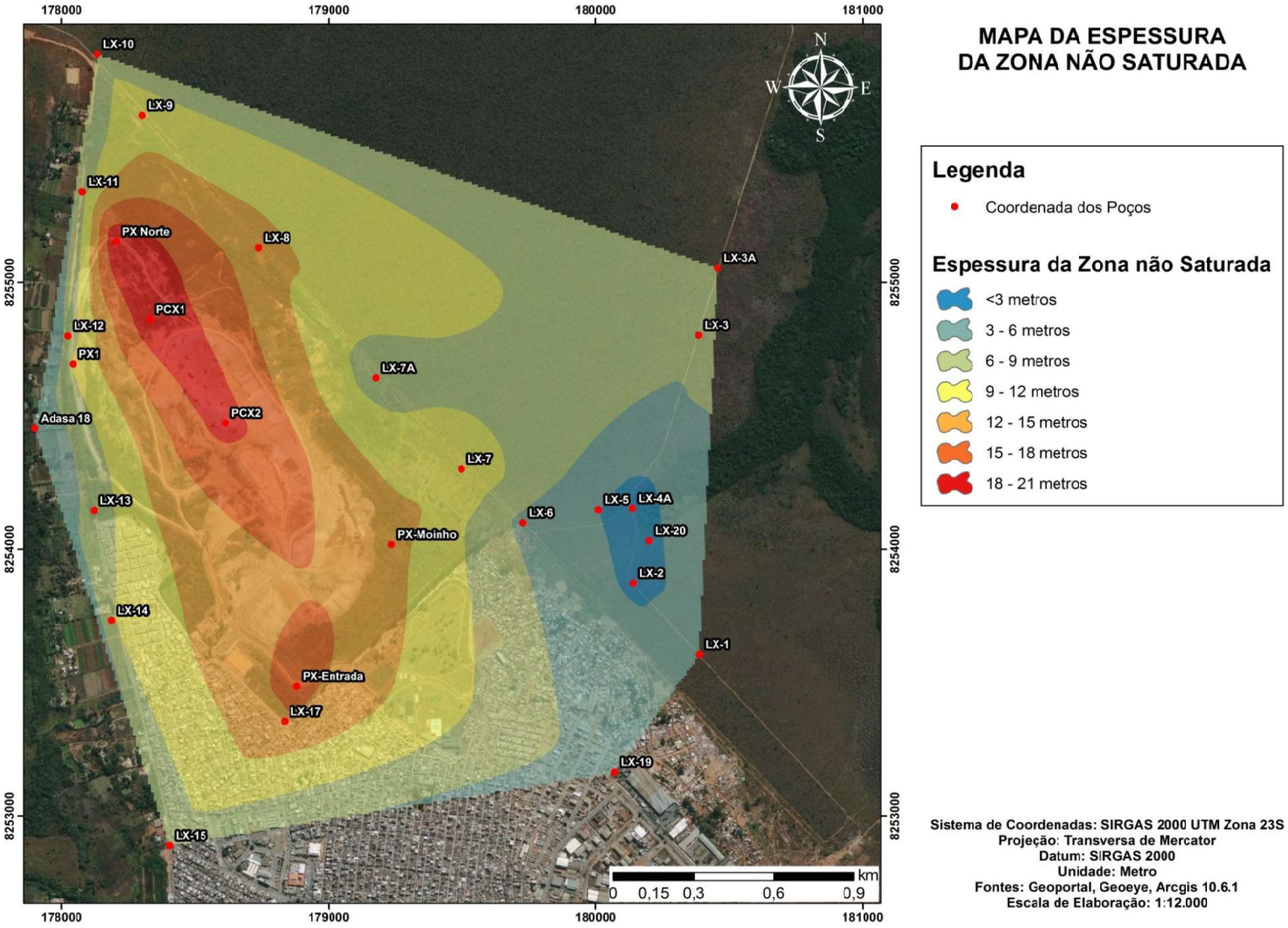


Figura 21 - Espessura da zona vadosa do aquífero freático, representado por latossolos e por resíduos acumulados.

3.2 Sentido do Fluxo Subterrâneo

A partir do mapa potenciométrico pode-se determinar o fluxo subterrâneo que se distribui a partir do maciço de resíduos mais recentemente acumulado (porção da crista elevada do lixão) em direção às áreas mais rebaixadas adjacentes. Assim, foi possível propor o mapa da Figura 22, confeccionado diretamente sobre o mapa potenciométrico e a partir da premissa de que o aquífero existente é do tipo homogêneo e isotrópico (resíduos e solos com porosidade intergranular sem camadas confinantes e sem a influência de zonas fraturadas). Neste caso as linhas de fluxo são perpendiculares às linhas equipotenciais (conforme indicação das setas no mapa de sentido de fluxo).

A partir do maciço de resíduos é possível se verificar cinco divisões do fluxo da água subterrânea e consequentemente da pluma de contaminação (Figura 22). O fluxo se distribui para os quadrantes Oeste e Leste a partir da porção central da crista de resíduos. No quadrante oeste, a partir da zona norte do lixão há fluxo no sentido oeste / S60W; a partir da porção central e sul do aterro há fluxo no sentido S45W e no extremo sul do maciço o fluxo é para S20-30W migrando sob a área urbana. Todo o fluxo do quadrante oeste migra em direção ao córrego Cabeceira do Valo. No quadrante leste dois sentidos de fluxo podem ser individualizados: para leste (podendo variar até S60-70E) a partir da zona principal de acumulação de resíduos e para N45E a partir do lixo antigo acumulado na área do parque urbano da Cidade Estrutural em direção à zona de cabeceira do córrego do Acampamento.

Avaliação preliminar do poder de diluição e atenuação pode ser considerada em dois casos em que existem pares de poços que permitem tal tipo de análise: poços PX Entrada e LX17 e poços PX Moinho e LX6. E importante salientar que o gradiente hidráulico entre os dois pares é similar e que no primeiro caso existe aterro na zona saturada do aquífero e no segundo não há aterro, tratando-se de Latossolo com feições físicas preservadas.

No caso do par de poços PX Entrada e LX17 a condutividade elétrica da pluma varia de 127,8 para 60,0 µS/cm, em uma distância de aproximadamente 145 metros, o que resulta em um fator de diluição de 0,46 µS/cm por metro de migração no aquífero. No par PX Moinho e LX6 há uma variação de CE de 959 para 118 µS/cm em 375 metros de fluxo, resultando em um fator de diluição de 2,24 µS/cm / metro. Esta avaliação é preliminar, mas permite ter uma aproximação do poder de diluição que as águas de recarga imprimem na atenuação da pluma de contaminação.

Este mapa de fluxo deverá ser a base para avaliação de componentes hidráulicos como velocidade de fluxo para previsão de migração e tempo de trânsito da pluma, análises de diluição incluindo os componentes recarga e diluição, além de outros aspectos vinculados ao modelo conceitual de fluxo subterrâneo.

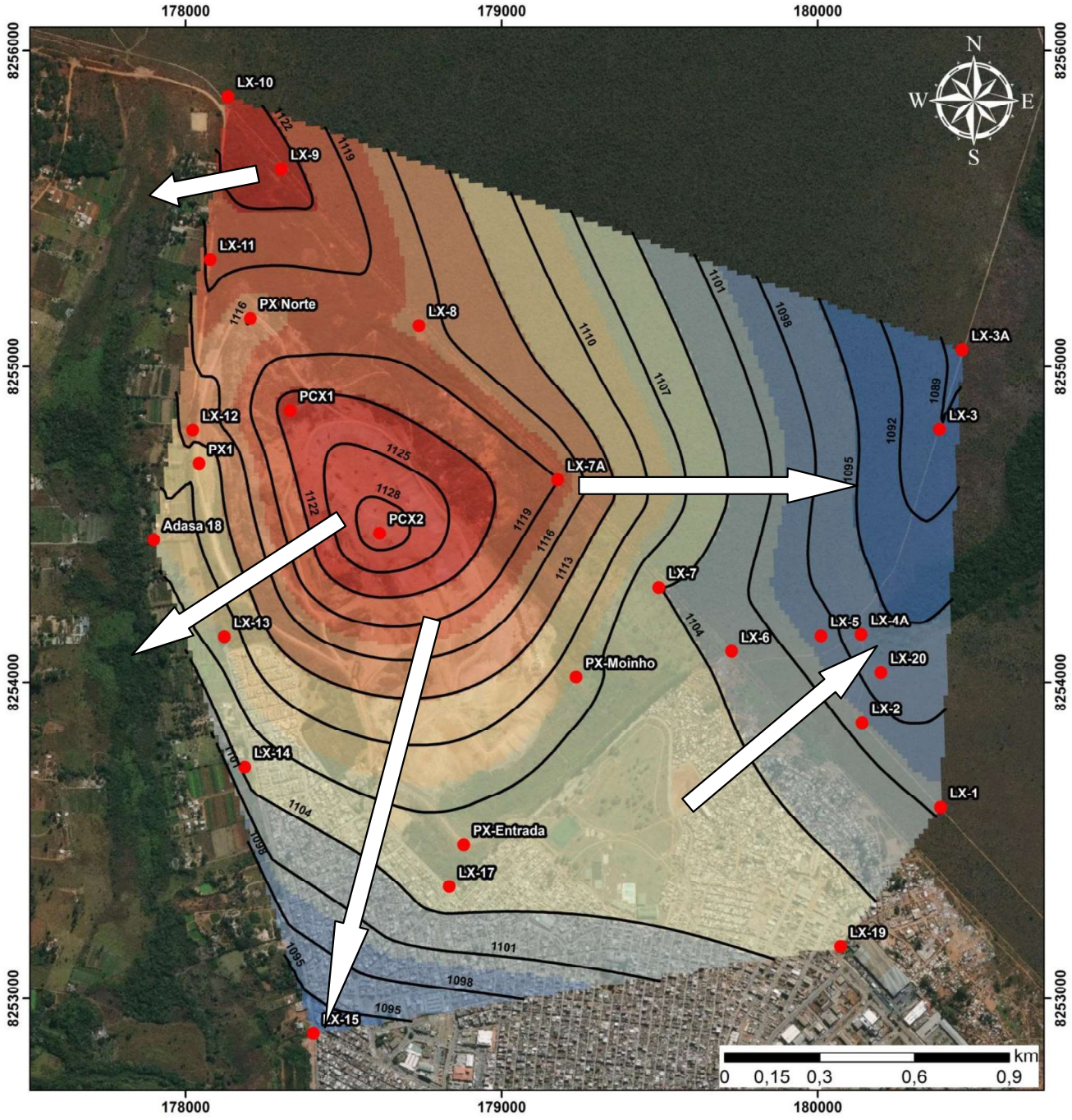


Figura 22 - Mapa do sentido de fluxo das águas subterrâneas. Este padrão de fluxo deverá controlar a migração da pluma de contaminação.

4. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS

4.1 Escolha dos pontos de Amostragem e Monitoramento

Para a determinação dos pontos de amostragem para a verificação da qualidade das águas superficiais e sua relação com a área de acumulação de resíduos no Lixão da Estrutural foram utilizados os seguintes critérios:

- relação hidráulica entre as áreas das nascentes e suas bacias com o aterro de resíduos;
- conexão hidráulica entre o aquífero freático e as nascentes;
- a posição proximal do curso d'água em suas áreas de nascentes e

- a determinação do fluxo de escoamento subterrâneo determinado em modelos numéricos propostos por trabalhos prévios (Carneiro, 2002 e Campos, 2007).

Desta forma, foram determinados 4 pontos de amostragem nas três cabeceiras que fluem a partir da área do lixão: dois pontos no córrego Cabeceira do Valo (sendo um antes e um na confluência com o córrego Cana do Reino); um na região de nascente do Córrego do Acampamento e um na zona de nascente do Ribeirão Bananal; além da lagoa de acumulação de chorume.

4.2 Métodos Analíticos

Os métodos analíticos são os mesmos aplicados para as análises de águas subterrâneas uma vez que as análises foram realizadas no mesmo Laboratório Tommasi Ambiental e foram analisadas e medidas *in situ* as mesmas substâncias e os mesmos parâmetros. Basicamente foram aplicados os métodos de análises por emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplada (ICP-OES) e espectrofotometria, além de medidas *in situ* com equipamento multiparâmetro da marca Hach (modelo HC 40d).

Da mesma forma que as análises de águas subterrâneas e da pluma de contaminação, depois da coleta, as amostras foram preservadas em caixa de isopor com gelo para manutenção da temperatura abaixo de 20º C.

As amostras foram obtidas de pontos de acumulação de água próximo às nascentes ou no curso d'água principal com fluxo livre, isto é, em zona de correnteza sem estagnação.

4.3 Resultados das Análises Hidroquímicas

Até o momento estão disponíveis 4 amostras de águas consideradas representantes do ambiente "superficial", embora apesar de serem águas brutas coletadas em cursos de água em reservatório de chorume, ainda guardam estreita relação com os reservatórios subterrâneos (aquífero freático, no caso das amostras de córregos) e maciço de resíduos sólidos (no caso da piscina de chorume).

Para efeitos da avaliação da qualidade das águas subterrâneas foram considerados 4 pontos na rede de monitoramento. Os pontos são denominados de RB1 correspondente à nascente do Ribeirão Bananal; CA1 associado à zona de nascente do Córrego do Acampamento; CV2 relacionado ao Córrego Cabeceira do Valo e LC1 representado pela Lagoa de Chorume situada no interior da área do Lixão da Estrutural. Esta rede deverá ser oportunamente adicionada de outros pontos nos córregos Cabeceira do Valo e do Acampamento de forma a melhorar a caracterização das relações entre a descarga da pluma de contaminação e a qualidade das águas superficiais.

A Tabela 5 traz os resultados da primeira campanha de amostragem das águas superficiais.

Substância / Parâmetro	Ponto de amostragem-amostra					
	RB1-01	**CA1-01**	**CV1-01**	**CV2-01**	**LC-01**	**Padrão Potabilidade**
Condutividade Elétrica (em µS/cm)	6,09	22,5	73,4	64,5	10.710	-
Temperatura (°C)	20,0	22,5	18,8	20,1	22,6	-
pH	5,05	4,85	7,9	7,37	9,09	6 a 9
Amônia	2.800	3.100		2.700	882.000	1.500
Nitrito	> LQ	> LQ	31,0	30,0	> LQ	1.000
Nitrato	> LQ	> LQ	900	700	200	10.000
Cloreto	200	100	14.700	8.500	1.195.000	250.000
Sulfato	> LQ	> LQ	2.000	> LQ	> LQ	250.000
DQO	> LQ	> LQ	6.000	> LQ	440.000	-
Antimônio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	5
Arsênio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	10
Bário	> LQ	> LQ	14,1	> LQ	160	700
Cádmio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	5
Chumbo	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	10
Cobalto	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	310	70
Cobre	2,6	1,0	> LQ	1,6	> LQ	2.000
Crômio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	41	50
Mercúrio	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	1
Níquel	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	> LQ	70
Zinco	46	31	36,3	38	47	1.800
Cálcio	470	280	1.180	3.220	53.240	-
Magnésio	110	180	22,7	410	76.690	-
Sódio	450	310	8.170	5.500	868.840	200.000

Tabela 5 - Resultados de análises de águas consideradas no sistema superficial. Condutividade Elétrica em µS/cm; Temperatura em °C; demais substâncias em µg/L. LQ - limite de quantificação do método analítico.

4.4 Extensão da Contaminação das Águas Superficiais

Considerando as análises de amostras de águas nos cursos d'água que drenam a partir da região de acumulação dos resíduos pode-se afirmar que o Ribeirão Bananal em sua zona de nascente apresenta água com a qualidade natural preservada, mantendo valores de sólidos totais dissolvidos muito baixos, sendo suas águas na zona de cabeceira classificada como Classe Especial (segundo Resolução Conama 357 de 17 de março de 2005).

O mapa da Figura 23 mostra a qualidade da água dos cursos superficiais que drenam a partir da área de acumulação histórica dos resíduos sólidos.

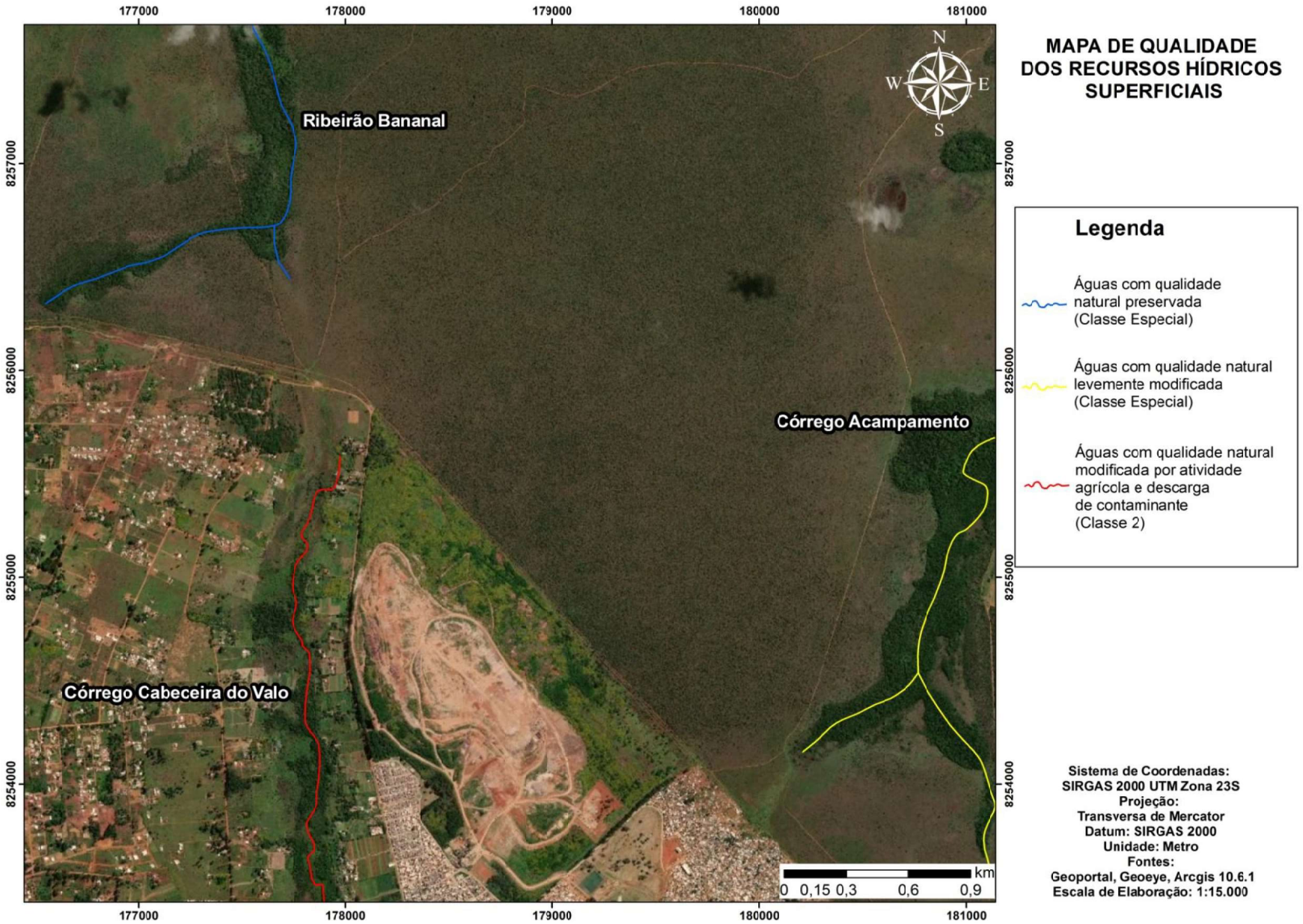


Figura 23 - Distribuição qualitativa das águas dos cursos superficiais das três bacias que drenam a partir da área do Lixão da Estrutural.

O Córrego do Acampamento apresenta alguns parâmetros fracamente influenciados pela contaminação do aquífero pelo aterro de resíduos, entretanto, de forma extremamente tênue. Os principais parâmetros que determinam esta condição são a condutividade elétrica da água e o teor de amônia, da ordem de 3.100 μg/L. Embora tais parâmetros sejam indicadores da modificação antrópica, estas águas ainda são caracterizadas como da Classe Especial, por apresentarem potabilidade natural (sem necessidade de tratamento) e por situarem-se no interior de uma unidade de conservação ambiental de proteção integral.

O Córrego Cabeceira do Valo é um dos braços (com drenagem geral de norte para sul) que em associação com o córrego Cana do Reino (que drena de oeste para leste) compõem o Ribeirão Vicente Pires. A qualidade das suas águas já mostra a influência da antropização da área, sendo que este curso hídrico recebe contaminação oriunda de duas fontes principais: chorume produzido na zona saturada do sob o maciço de lixo e efluentes gerados pela agricultura intensiva realizada em grande parte da área de sua vertente leste. Os principais indicadores da contaminação incluem: cloreto, sódio, cálcio e magnésio. A condutividade elétrica variável entre 65 e 73 μS/cm embora, ainda reduzida, é outro indicador consistente. Segundo a Resolução Conama 357 este curso d'água é enquadrado como da Classe 2, uma vez que suas águas podem ser destinadas: ao abastecimento humano, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, como natação e mergulho; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques e jardins; e à aquicultura e atividade de pesca.

A contaminação no Córrego Cabeceira do Valo não é maior que a atualmente observada, pois sua vertente oeste apresenta ampla área de contribuição ainda preservada da ocupação humana ou em processo de ocupação ainda incipiente. Assim, a descarga do aquífero freático de oeste para leste resulta na contribuição de uma vazão superior à vertente em que o Lixão está situado. Como estas águas ainda apresentam boa qualidade, parte do chorume que é descarregado no curso d'água superficial é diluída. Agricultores que captam águas de nascentes da margem oeste informam que estes exutórios apresentam águas com qualidade equivalente à potabilidade natural (isto é, sem necessidade de tratamento).

5. CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS

5.1 Materiais e Métodos

Para fins de diagnóstico da contaminação dos solos foram considerados diferentes tipos de contaminantes associados diretamente às áreas de disposição de resíduos no interior da área do lixão (incluindo o maciço do lixo e áreas embargadas no limite entre o lixão e o Parque Nacional de Brasília); áreas de acumulação de resíduos fora dos limites do lixão, além de áreas que recebem efluentes provenientes de área urbana não consolidada (ocupação de "Santa Luzia").

Assim são consideradas fontes potenciais de contaminação os resíduos sólidos urbanos com componentes orgânicas e inorgânicas e as fontes de efluentes domésticos sem nenhum tipo de tratamento. A contaminação deverá ser observada principalmente na forma de fases orgânicas (coliformes e outras bactérias), fases inorgânicas não metálicas (amônia, nitrito, nitrato, cloreto e fosfato) e fases inorgânicas metálicas (metais de transição). Para o presente trabalho as análises foram focadas nos principais indicadores da contaminação dos solos em área de disposição de resíduos sólidos domésticos que são os metais.

A amostragem dos solos foi realizada com auxílio de cavadeira articulada tipo "boca de lobo" (Figura 24) e trado manual de 4 polegadas de diâmetro (Figura 25), sendo considerados dois tipos de amostras: composta e simples. As amostras compostas representam duas profundidades de coleta em um mesmo ponto, entre 10 e 30 cm e entre 50 e 65 cm, e a amostra simples corresponde ao material retirado entre 10 e 30 cm de profundidade, sendo que a maior parte do material é obtida entre 10 e 20 cm. Além das ferramentas manuais, a trena de mão foi aplicada para determinação da profundidade de coleta do material. Toda amostra foi georreferenciada com auxílio de GPS portátil com erro de posicionamento inferior a 1 metro.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de 30 x 60 cm e cada amostra identificada com rótulo padrão com a seguinte codificação 1SO - nA ou 1SO - nB, onde: **1SO** representa a primeira campanha de amostragem, **n** o número sequencial de cada amostras e A e B, respectivamente amostra rasa e profunda (nos casos de amostragem composta, Figura 26). Os resultados desta campanha de amostragem, além de ser aplicados ao diagnóstico da contaminação, também serão utilizados em experimentos de fitorremediação e de fixação de metais no solo.

A Tabela 6 traz a identificação das amostras, sua localização por coordenadas UTM e as principais características dos pontos de coleta.

Para efeito da presente pesquisa o conhecimento dos teores de metais biodisponíveis é considerado mais relevante que o conteúdo total de metais nos solos, e, portanto, para a extração foram utilizadas soluções de KCl e Reagente Mehlich 1.

Para as análises geoquímicas de solos e rochas diferentes tipos de extratores ou digestores das amostras podem ser utilizados, sendo sua escolha função dos objetivos da pesquisa. Por exemplo, quando se utilizada a geoquímica dos solos para a prospecção de metais a partir de elementos farejadores, utiliza-se a técnica de digestão total, com aplicação de Água Régia a quente (mistura de ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO3) concentrado numa proporção de 3:1, a uma temperatura superior a 400oC).

Quando a geoquímica de solos é aplicada para a determinação de nutrientes dos solos disponíveis para as plantas (ex. Na+, K+, Ca2+ e Mg2+), utiliza-se ácido acético a frio, pois por se tratar de um ácido fraco apenas solubilizará os nutrientes livres para serem apropriados pelas raízes e não os elementos ligados aos minerais estáveis que compõem os solos.

Figura 24 - Amostragem de solo superficial com uso de cavadeira articulada.

Figura 25 - Amostragem de solo em profundidade de 60 cm com auxílio de trado manual.

Figura 26 - Amostras em diferentes profundidades em um mesmo ponto.

Amostra	Coordenadas UTM	Observações
1SO - 1A	179427 / 8254160	Latossolo Vermelho argiloso, com textura argilosa, coletado em área em que houve deposição e aterro de resíduos sólidos urbanos, com posterior remoção, tanto dos resíduos, como da porção superficial dos solos (*top soil*, incluindo horizontes A e AB). Localmente ainda são observados restos de resíduos em locais em que são observados restos orgânicos, plástico, muitos fragmentos de vidro e localmente restos de material metálico (principalmente ferro). Área em que se desenvolve o experimento de estabilização de metais biodisponíveis no solo com elevação de pH. Amostras retiradas no dia 03 de janeiro de 2020.
1SO - 1B		
1SO - 2A	179404 / 8254157	
1SO - 2B		
1SO - 3A	179388 / 8254155	
1SO - 3B		
1SO - 4A	179364 / 8254157	
1SO - 4B		
1SO - 5A	179340 / 8254155	
1SO - 5B		
1SO - 6A	179444 / 8254142	
1SO - 6B		
1SO - 7A	179444 / 8254142	
1SO - 7B		
1SO - 8A	179470 / 8254096	
1SO - 8B		
1SO - 9A	179480 / 8254076	
1SO - 9B		
1SO - 10A	179367 / 8254133	
1SO - 10B		
1SO - 11A	179369 / 8254114	
1SO - 11B		
1SO - 12A	179372 / 8254093	
1SO - 12B		
1SO - 13A	179378 / 8254059	
1SO - 13B		
1SO - 14A	179453 / 8254208	Latossolo Vermelho, com textura muito argilosa, com remoção dos horizontes superficiais em local em que foram acumulados resíduos sólidos, os quais foram posteriormente removidos. Área situada em uma faixa de 300 metros de largura entre o sítio de acumulação de resíduos e o Parque Nacional de Brasília, denominada de "área embargada", pois é uma faixa em que não há autorização para acumulação de resíduos. Área em que é desenvolvido experimento de fitorremediação de área degradada pela supressão da vegetação nativa, acumulação de resíduos e remoção de horizontes superficiais dos solos. Amostras retiradas no dia 10/03/2020
1SO - 14B		
1SO - 15A	179442 / 8254234	
1SO - 15B		
1SO - 16A	179418 / 8254255	
1SO - 16B		
1SO - 17A	179395 / 8254280	
1SO - 17B		
1SO - 18A	179380 / 8254312	
1SO - 18B		
1SO - 19A	179356 / 8254345	
1SO - 19B		
1SO - 20A	179344 / 8254375	
1SO - 20B		
1SO - 21A	179475 / 8254187	
1SO - 21B		
1SO - 22A	179497 / 8254217	
1SO - 22B		
1SO - 23A	179520 / 8254185	

1SO - 23B		
1SO - 24A	179497 / 8254150	
1SO - 24B		
1SO - 25A	179526 / 8254124	
1SO - 25B		
1SO - 26A	179567 / 8254146	
1SO - 26B		
1SO - 27A	179551 / 8254092	
1SO - 27B		
1SO - 28	179059 / 8254147	Topo de aterro, com material acumulado em canaleta de drenagem pluvial.
1SO - 29	821267 / 8254613	Material rico em matéria orgânica em local em que o chorume drena diretamente na base de um talude de resíduos.
1SO - 30	821110/ 8255814	Área de acumulação periódica de resíduos de natureza diversa, contendo matéria orgânica, plástico, papel, dentre outros.
1SO - 31	280978 / 825430	Margem da estrada marginal ao lixão em uma borda noroeste. Histórico de acumulação de aterros e resíduos sólidos.
1SO - 32	821249 /8254095	Latossolo vermelho com textura argilosa, situado imediatamente na margem de aterro antigo.
1SO - 33	178844 / 8253327	Área de acumulação periódica resíduos. Matriz de restos de obra com resíduos orgânicos de forma subordinada.
1SO - 34	179746 / 8254081	Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa situado no limite entre o Parna Brasília e a ocupação de “Santa Luzia”.
1SO - 35	179950 / 8253866	Latossolo Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa, que recebe efluentes líquidos oriundos da ocupação de “Santa Luzia”.
1SO - 36	180123 / 8254159	Latossolo Vermelho-Amarelo em área preservada no interior do Parque Nacional de Brasília.
1SO - 37	180518 / 8254243	Latossolo Vermelho-Amarelo em área preservada no interior do Parque Nacional de Brasília.
1SO - 38	179508 / 8254499	Latossolo Vermelho textura muito argilosa a cerca de 200 metros do limite da área de acumulação de resíduos.
1SO - 39	178909 / 8254979	Ltossolo Vermelho, em ambiente preservado no limite entre o Parque Nacional de Brasília e a “área embargada”.
1SO - 40	179243 / 8254130	Área de acúmulo de resíduos no interior do lixão.
1SO - 41	178577 / 8255103	Misturas de solos na área do atrro
1SO - 42	193854 / 8254759	Latossolo Vermelho no Centro Olímpico da Universidade de Brasília. Solo similar e contexto geológico similar à área do Lixão da Estrutural

Tabela 6 - Localização e principais feições dos pontos de amostragem dos solos aplicados para o diagnóstico da contaminação dos solos na área do Lixão da Estrutural e adjacências. As amostras 1SO-28 a 1SO-42 foram coletadas no dia 14/03/2020.

Além dos extremos dos extratores para geoquímica, considerando a extração total (ex. Água Régia a quente, ou fusão), ou a extração limitada (ex.: solução de KCl ou ácido acético) existem inúmeros outros método de extração incluindo os ácidos cítrico, lático e oxálico com diferentes pHs.

Na presente pesquisa foram utilizados dois tipos de extração para as análises de metais nos solos. Todas as amostras foram submetidas à extração pelo método de Mehlich 1 (ácido clorídrico + ácido sulfúrico a frio) uma vez que, o objetivo é determinar os metais biodisponíveis, e essas análises foram realizadas no Laboratório Soloquímica. Amostras selecionadas (em um total de 28 coletadas nos diferentes locais de amostragem) foram submetidas à fusão alcalina com borato de lítio (LiBO2) a 950^{o}C seguida por redissolução por ácido clorídrico (HCl) 2 Molar no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília. Este tipo de extração por fusão permite a solubilização dos metais inclusive de minerais muito estáveis como rutilo e magnetita presentes no solo.

Após a etapa de extração as soluções obtidas pelos dois métodos de extração foram analisadas em equipamento de espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplada (ICP-OES).

Para efeitos de avaliação dos resultados foram utilizados os valores orientadores de qualidade para o Estado de São Paulo (CETESB 2016) para os metais analisados, conforme Tabela 7.

Metal	**Valor de Referência de Qualidade**	**Valor de Prevenção**	**Valor de Intervenção**		
			Agrícola	**Residencial**	**Industrial**
Cobre	35	60	760	2.100	10.000
Zinco	60	86	1900	7.000	10.000
Chumbo	17	72	150	240	4.400
Cádmio	<0,5	2	5	10	25
Arsênio	3,5	15	35	55	150
Mercúrio	0,05	2	5	10	25

Tabela 7 - Valores orientadores para diferentes categorias dos metais analisados no presente trabalho aplicados para solos. Teores em mg/Kg em peso de solo seco. Segundo CETESB (2016).

5.2 Resultados das Análises e Discussão

A Tabela 8 traz os resultados das análises das substâncias consideradas os principais indicadores de contaminação por resíduos sólidos urbanos. Além dos metais apresentados nesta tabela ainda foram analisados Cádmio, Arsênio e Mercúrio, entretanto estes metais de transição apresentaram resultados inferiores ao Limite de Quantificação (LQ) do método analítico, que é de 0,01 mg/kg de peso de solo seco, e portanto não foram apresentados.

O pH em água varia de 5,5 a 7,0, sendo a maioria das amostras com pH ácido a levemente ácido e apenas duas amostras com pH neutro. O pH em KCl varia entre 4,3 e 7,0 sendo que a ampla maioria das amostras apresentam valores inferiores a 6,5. Assim, o ΔpH é negativo em mais de 95% das análises, mesmo considerando as amostras compostas. A relação entre o pH em água e em solução de KCl resulta em ΔpHs negativos, isto é, na maior tendência dos solos estudados reterem cátions com relação a retenção de ânions.

O potássio trocável apresentou valores baixíssimos flutuando entre 0,01 a 0,59 Cmol/dm^3 (*centimol* por decímetro cúbico de solo) sendo a maior parte dos resultados inferiores a 0,05 Cmol/dm^3. Estes valores reduzidos são coerentes com as classes de latossolos observados nas áreas de amostragem e aparentemente não há nenhuma fonte de contaminação por este cátion nas fontes de resíduos domésticos.

Os resultados das análises de cálcio apresentaram valores variáveis entre 0,7 e 12,5 Cmol/dm^3 e os teores mais elevados que 1,0 Cmol/dm^3 devem ser considerados como indicadores de contaminação, uma vez que este nutriente é muito restrito nos latossolos derivados de metassedimentos do Grupo Paranoá no Distrito Federal. Apesar de ser considerado um indicador de contaminação, isto é, por fonte externa aos ambientes geogênico e pedogênico os valores são baixos com relação aos máximos que poderiam eventualmente causar impacto ambiental. A fonte antropogênica mais provável deste metal são os resíduos de blocos de concreto amplamente espalhados pela área do aterro e adjacências. É fácil notar na avaliação dos resultados que os teores mais elevados são associados às áreas com maior atividade antrópica e maior volume de aterros de resíduos.

O sódio ocorre em valores baixíssimos, entre 0,01 e 0,17 Cmol/dm^3 sendo um cátion muito solúvel que dificilmente fica retido nos solos tropicais. Os valores reduzidos já são esperados em função no material parental, em que não existem minerais ricos em sódio, além de serem perfis muito evoluídos que tendem a eliminar por lixiviação esta fase catiônica.

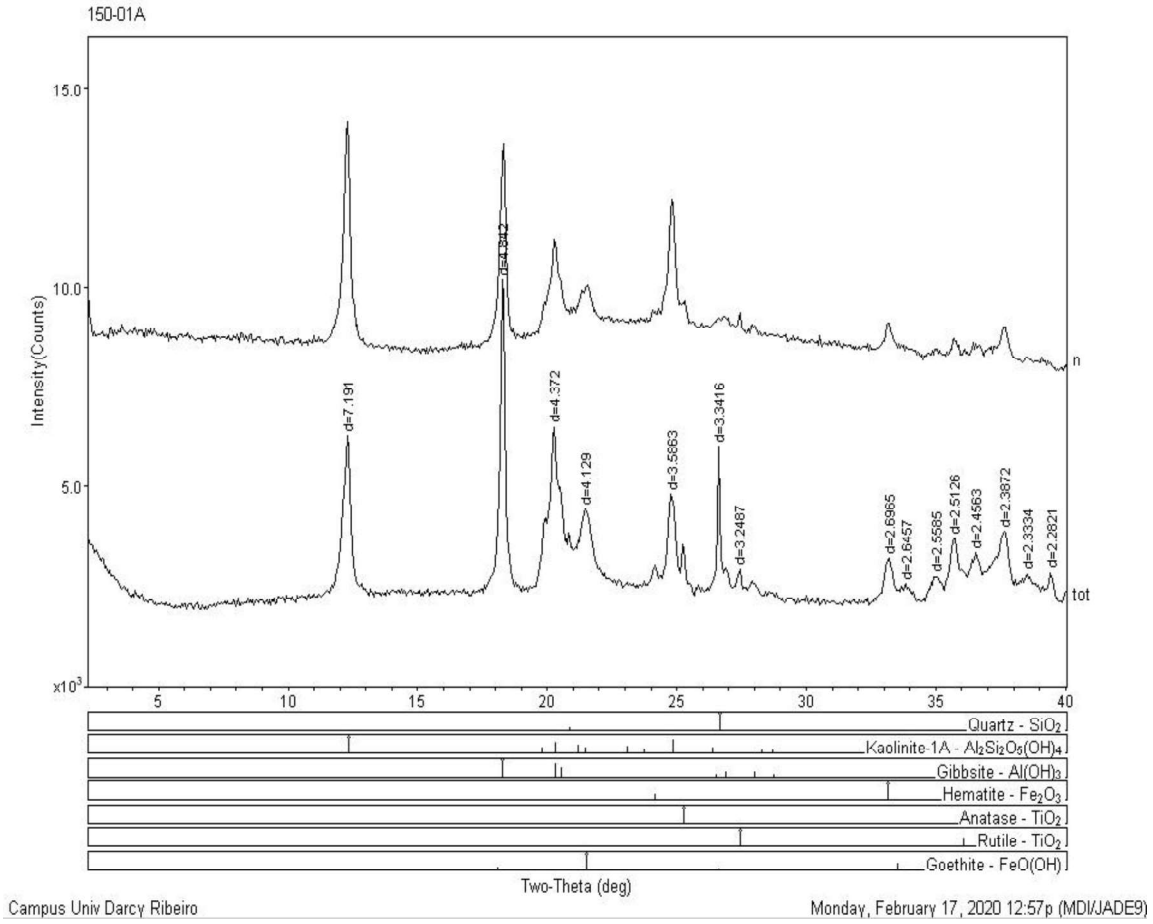
O alumínio resulta em valores muito reduzidos entre zero e 0,3 Cmol/dm^3 sendo valores considerados anômalos, uma vez que são esperados teores mais elevados de alumínio trocável no tipo de solo estudado. A provável explicação para os resultados encontrados deve ser vinculada à mineralogia em que o alumínio está associado, representada eminentemente por caolinita e gibisita que são minerais de ampla estabilidade e não são digeridos pelo método Mehlich I. A Figura 27 apresenta os difratogramas de Raios X das amostras SO-15A e SO-15B que indicam a presença dos seguintes minerais: quartzo, caolinita, gibsita, hematita, anatásio, rutilo e goethita.

Substância	pH	pH	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Pb
Método de Extração	**Água**	**KCl**	**KCl**	**KCl**	**KCl**	**Mehlich I**	**KCl**	**Mehlich I**	**Mehlich I**	**Mehlich I**	**Mehlich I**
Unidade de Medida	-	-	$cmol_c/dm^3$	$cmol_c/dm^3$	$cmol_c/dm^3$	$cmol_c/dm^3$	$cmol_c/dm^3$	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1SO - 1A	6,30	5,10	0,05	2,70	0,60	0,01	0,00	57,9	0,50	0,50	0,50
1SO - 1B	6,10	5,20	0,04	0,90	0,10	0,01	0,00	103,7	0,50	0,10	0,50
1SO - 2A	6,00	5,30	0,04	2,90	0,50	0,01	0,00	62,4	0,40	0,30	0,60
1SO - 2B	5,90	4,90	0,06	0,70	0,10	0,01	0,00	97,9	0,40	0,01	0,70
1SO - 3A	6,10	5,30	0,03	3,30	0,70	0,01	0,00	75,5	0,50	1,80	0,70
1SO - 3B	5,80	5,30	0,02	0,60	0,00	0,01	0,10	71,7	0,30	0,01	0,60
1SO - 4A	6,10	5,50	0,04	4,80	0,40	0,02	0,00	127,4	0,90	3,60	0,70
1SO - 4B	5,70	5,40	0,02	0,80	0,00	0,01	0,10	117,5	0,40	0,10	0,60
1SO - 5A	5,90	5,40	0,04	2,10	0,30	0,01	0,00	79,5	0,40	0,30	0,70
1SO - 5B	5,80	5,50	0,02	0,80	0,00	0,01	0,00	102,9	0,40	0,10	0,80
1SO - 6A	6,00	5,60	0,07	2,90	0,50	0,01	0,00	73,4	0,40	0,30	0,70
1SO - 6B	5,80	5,40	0,03	0,70	0,10	0,01	0,00	95,4	0,40	0,01	0,70
1SO - 7A	5,90	5,50	0,04	1,80	0,30	0,01	0,10	70,7	0,50	0,10	0,50
1SO - 7B	5,80	5,50	0,03	0,60	0,10	0,01	0,10	67,5	0,30	0,01	0,70
1SO - 8A	6,10	5,60	0,03	1,50	0,30	0,01	0,00	60,6	0,40	0,10	0,70
1SO - 8B	5,80	5,70	0,02	0,70	0,10	0,01	0,10	101,7	0,50	0,01	0,60
1SO - 9A	5,80	5,50	0,03	1,60	0,20	0,01	0,00	110,5	0,50	0,10	0,70
1SO - 9B	5,60	5,40	0,02	0,80	0,10	0,01	0,00	98,8	0,40	0,01	0,70
1SO - 10A	5,80	5,40	0,03	2,50	0,40	0,01	0,00	95,5	0,40	0,40	0,70
1SO - 10B	5,60	5,50	0,01	0,90	0,10	0,01	0,00	114,7	0,40	0,20	0,70
1SO - 11A	6,20	5,40	0,02	2,40	0,40	0,01	0,00	120,3	0,60	0,30	0,70
1SO - 11B	5,60	5,20	0,01	1,10	0,10	0,01	0,00	61,2	0,40	0,10	0,60
1SO - 12A	6,70	5,30	0,03	3,50	0,40	0,01	0,10	42,0	0,40	0,50	0,70
1SO - 12B	5,50	5,40	0,01	0,70	0,00	0,01	0,00	43,3	0,40	0,10	0,60
1SO - 13A	6,00	5,10	0,02	0,90	0,10	0,01	0,00	73,3	0,60	0,10	0,50

1SO - 13B	5,80	5,40	0,01	0,70	0,10	0,01	0,00	89,6	0,50	0,01	0,50
1SO - 14A	6,10	5,30	0,02	1,40	0,20	0,01	0,00	47,9	0,40	0,20	0,60
1SO - 14B	5,70	5,50	0,02	0,80	0,10	0,01	0,10	44,4	0,30	0,10	0,60
1SO - 15A	6,20	5,40	0,04	5,10	0,70	0,01	0,00	60,8	1,40	2,90	0,90
1SO - 15B	5,80	5,70	0,02	1,60	0,10	0,01	0,00	36,6	0,30	0,10	0,60
1SO - 16A	6,20	5,60	0,03	5,60	0,50	0,01	0,00	81,3	3,00	6,30	1,70
1SO - 16B	5,90	5,80	0,01	2,60	0,20	0,01	0,00	50,5	1,00	1,40	1,00
1SO - 17A	6,30	5,80	0,02	2,90	0,30	0,01	0,00	55,5	1,60	3,00	0,80
1SO - 17B	6,30	6,00	0,02	1,70	0,10	0,01	0,00	32,2	0,50	0,20	0,60
1SO - 18A	6,30	5,90	0,03	6,00	0,70	0,01	0,10	77,6	3,30	9,20	1,60
1SO - 18B	6,10	6,10	0,01	2,80	0,20	0,01	0,00	44,6	0,60	0,60	0,80
1SO - 19A	6,60	5,80	0,03	3,90	0,50	0,01	0,10	35,3	1,00	2,50	2,60
1SO - 19B	6,20	5,80	0,01	1,40	0,10	0,01	0,10	37,7	0,30	0,20	0,70
1SO - 20A	6,50	5,80	0,03	4,50	0,60	0,01	0,10	27,1	0,50	0,80	1,40
1SO - 20B	6,30	5,90	0,01	1,30	0,10	0,01	0,10	39,5	0,30	0,10	0,90
1SO - 21A	6,30	5,60	0,05	2,50	0,40	0,01	0,00	75,9	0,30	0,01	1,00
1SO - 21B	6,20	5,10	0,03	1,20	0,10	0,01	0,00	59,1	0,30	0,01	1,00
1SO - 22A	6,10	6,00	0,03	4,90	0,70	0,01	0,00	57,3	1,50	2,80	1,80
1SO - 22B	5,70	6,20	0,02	1,90	0,20	0,01	0,00	49,0	0,60	0,30	1,00
1SO - 23A	6,00	6,00	0,04	5,50	0,60	0,01	0,00	96,2	3,80	7,70	2,00
1SO - 23B	5,60	6,20	0,01	2,00	0,10	0,01	0,00	39,1	0,40	0,20	1,00
1SO - 24A	6,10	6,10	0,02	4,00	0,40	0,01	0,10	70,5	2,30	3,40	2,60
1SO - 24B	5,90	6,30	0,02	2,30	0,20	0,01	0,10	42,9	0,70	0,40	1,00
1SO - 25A	6,20	6,40	0,02	4,90	0,70	0,01	0,00	52,9	0,70	4,60	2,50
1SO - 25B	6,10	6,20	0,02	0,20	0,70	0,01	0,10	81,4	2,20	0,60	1,50
1SO - 26A	6,40	6,20	0,02	6,80	0,70	0,01	0,10	108,7	3,50	7,90	1,50
1SO - 26B	6,10	6,40	0,01	2,50	0,20	0,01	0,10	31,6	0,60	0,50	1,10
1SO - 27A	6,80	6,10	0,02	3,90	0,40	0,01	0,00	60,6	1,20	1,50	1,50
1SO - 27B	6,40	6,30	0,01	1,60	0,10	0,01	0,10	36,6	0,40	0,10	1,00

1SO - 28	6,70	7,00	0,25	12,50	1,00	0,11	0,10	103,5	1,30	2,20	1,80
1SO - 29	6,60	6,50	0,04	10,00	0,90	0,01	0,00	75,8	0,90	0,30	1,40
1SO - 30	7,00	6,70	0,08	8,50	0,40	0,03	0,00	85,6	1,30	3,90	1,20
1SO - 31	6,80	6,50	0,04	5,80	0,60	0,02	0,00	156,6	1,10	0,80	1,20
1SO - 32	7,00	6,50	0,59	12,50	0,90	0,17	0,00	61,4	2,90	4,00	2,50
1SO - 33	6,90	6,90	0,04	3,70	0,40	0,01	0,00	207,9	1,50	2,60	1,50
1SO - 34	7,00	5,80	0,05	7,70	0,30	0,02	0,10	111,8	1,10	1,10	1,00
1SO - 35	6,80	6,20	0,02	2,10	0,20	0,01	0,10	125,4	0,90	0,80	1,30
1SO - 36	6,60	4,90	0,03	1,60	0,10	0,01	0,10	93,5	0,60	0,10	1,20
1SO - 37	6,20	4,60	0,03	0,90	0,10	0,01	0,10	68,0	0,60	0,10	1,20
1SO - 38	5,80	4,30	0,03	1,90	0,20	0,01	0,10	78,8	0,40	1,00	1,20
1SO - 39	5,70	4,40	0,03	1,00	0,10	0,01	0,30	91,1	0,60	0,10	1,20
1SO - 40	6,00	5,10	0,05	4,90	0,30	0,01	0,02	47,4	0,50	0,30	1,10
1SO - 41	6,20	6,20	0,01	1,00	0,10	0,01	0,10	40,1	0,80	0,30	1,20
1SO - 42	6,10	4,80	0,05	3,00	0,20	0,05	0,10	90,8	35,30	0,90	1,50

Tabela 8 - Resultados de análises de solos na área do Lixão da Estrutural e adjacências. Análises realizadas no Laboratório Soloquímica, com extração por solução de KCl ou pelo Método Mehlich I. Além das substâncias discriminadas nesta tabela foram analisados Cádmio, Arsênio e Mercúrio, entretanto todos os resultados retornaram valores inferiores ao Limite de Quantificação do método que é de 0,01 mg/kg de peso de solo seco para estes três metais pesados.



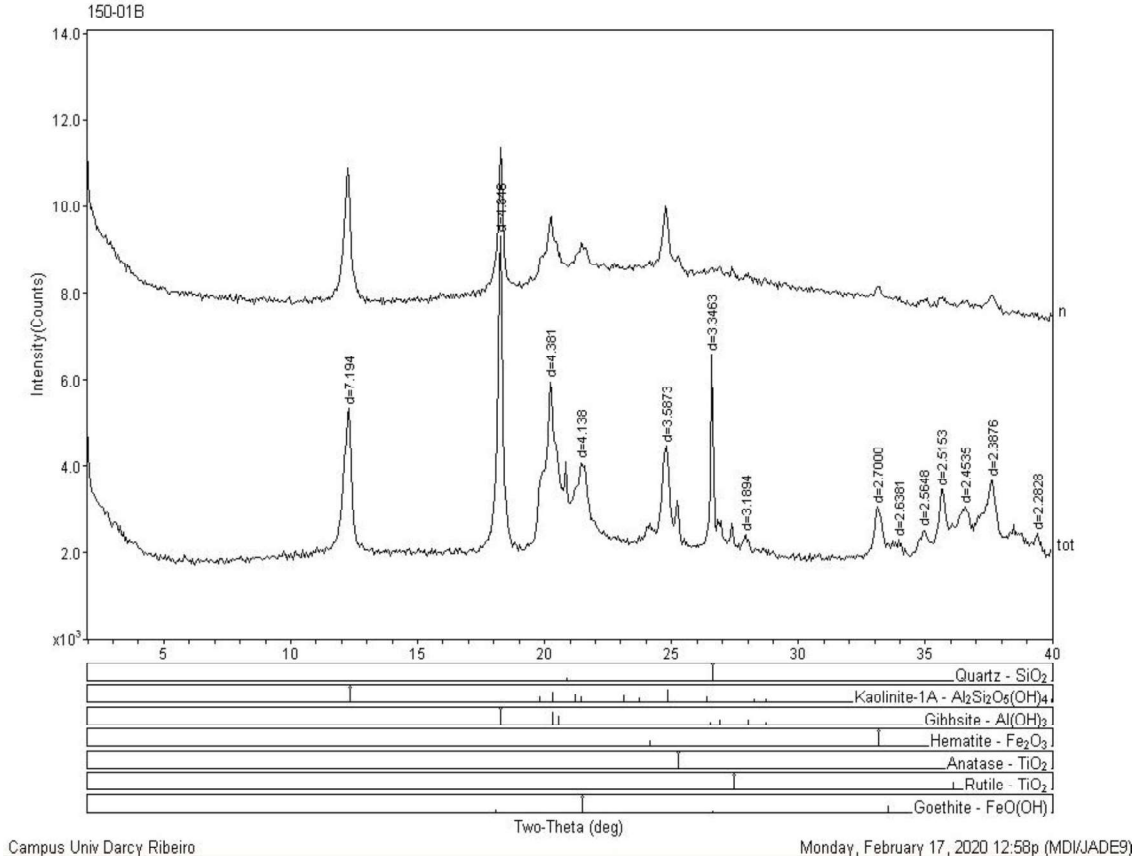


Figura 27 - Difratogramas de Raios X das amostras SO-15A e SO-15B. **tot** - representa a amostra total analisada pelo método do pó. **n** - representa a separação da fração argilosa.

O ferro é o metal mais abundante nos solos estudados, sendo os valores variáveis entre 32,2 e 207,9 mg/kg com valor médio de 75,15 mg/kg. Este ferro deve ser em parte associado aos minerais hematita e goethita, mas também deve ser principalmente vinculado às fases amorfas presentes nos latossolos e não se pode desconsiderar a possibilidade de ser associado a eventual contaminação em função da decomposição dos resíduos domésticos e de escombros de obras.

Com relação aos metais pesados que apresentaram teores acima do limite de quantificação do método analítico, destacam-se o cobre, zinco e chumbo, respectivamente com os seguintes intervalos de variações: 0,3 a 2,90; 0,01 a 7,9 e 0,5 a 2,6 mg/kg. Os valores são significativamente maiores na área do aterro e proximidades diminuindo quando se afasta das áreas principais de acumulação dos resíduos. Mesmo sendo valores que devem ser considerados como de origem antropogênica, todos os valores obtidos são muito inferiores aos valores de referência de qualidade - VRQ considerados por CETESB (2106).

Os reduzidos valores dos resultados analíticos por metais tanto, por análises com extração pelo método Mehlich 1, quanto pelo método da fusão total indicam que os solos apresentam restrita contaminação por estes elementos de transição. Muito provavelmente esta constatação é vinculada ao tipo de resíduo acumulado por décadas na área, que se trata eminentemente de lixo doméstico. Contaminações em níveis mais elevados que alcançam valores de prevenção (VP) e de intervenção (VI) são mais comumente vinculados aos resíduos de atividades industriais específicas, incluindo mineração, indústria de curtumes, cromação e metalurgia.

As Tabelas 9 e 10 mostram os resultados das análises realizadas na Universidade de Brasília, respectivamente com a lista dos elementos maiores expressos em percentuais e os elementos traços em mg/kg.

A perda ao fogo representa a água que ocorre na hidratação dos hidróxidos de ferro e alumínio, incluindo a goethita, liminita e gibisita.

Todas as substâncias que foram analisadas pelo método por fusão total a alta temperatura apresentam valores superiores quando comparados à extração pelo método Mehlich 1. Neste caso são avaliados os metais trocáveis (biodisponíveis) e a fase contida em minerais estáveis (não biodisponíveis).

O destaque é o alumínio que resultou em valores próximos a zero quando a digestão foi realizada pelo método Mehlicch 1 e retorna valores entre 12,8 e 42% quando o método de extração é por fusão a elevada temperatura e redissolução. Neste caso, todo o alumínio é vinculado a minerais com ampla estabilidade no ambiente pedogênico como, por exemplo, gibsita.

Amostra	Elementos Químicos Maiores - (%)								
	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SiO	TiO_2	Perda ao Fogo
1A	39,3	0,2	10,3	0,2	0,1	0,1	21,1	1,9	24,32
3A	40,5	0,1	12,0	0,2	0,1	0,1	22,1	2,0	23,59
10A	40,7	0,1	12,6	0,2	0,1	0,1	20,2	2,0	24,12
11A	41,4	0,1	13,5	0,2	0,1	0,1	20,3	2,1	24,35
14A	41,6	0,1	12,4	0,2	0,1	0,1	20,3	2,1	24,08
15A	39,3	0,4	12,5	0,2	0,1	0,1	24,3	2,0	23,93
17A	39,3	0,3	12,9	0,2	0,1	0,1	25,2	2,0	22,20
20A	38,1	0,3	12,4	0,3	0,1	0,1	27,2	2,0	22,48
22A	38,9	0,3	12,6	0,1	0,1	0,1	24,0	2,0	24,35
1B	41,6	0,1	13,5	0,2	0,1	0,1	23,5	2,1	22,53
3B	41,6	0,1	13,8	0,2	0,1	0,1	23,5	2,2	22,12
10B	41,5	0,1	14,2	0,2	0,1	0,1	23,5	2,1	22,72
11B	42,4	0,1	14,2	0,2	0,1	0,1	20,7	2,2	23,50
14B	42,4	0,1	14,3	0,3	0,1	0,1	22,0	2,2	22,81
15B	42,0	0,2	13,7	0,2	0,1	0,1	23,8	2,2	22,17
17B	41,3	0,2	13,4	0,2	0,1	0,1	24,5	2,2	22,08
20B	40,1	0,1	13,2	0,3	0,1	0,1	27,4	2,1	21,15
22B	41,7	0,2	13,7	0,3	0,1	0,1	23,0	2,2	22,93
28	24,4	3,1	7,9	1,0	0,5	0,5	51,1	1,4	15,66
29	13,1	1,0	3,6	1,2	0,2	0,2	71,6	0,7	12,09
33	12,8	9,3	6,4	1,2	1,2	1,2	56,3	0,9	13,79
35	36,1	0,6	18,0	0,8	0,2	0,2	23,5	1,9	23,26
37	41,1	0,1	8,7	0,6	0,1	0,1	23,0	2,2	25,89
39	38,5	0,2	13,3	0,3	0,1	0,1	25,1	2,0	25,48
40	42,0	0,1	14,4	0,4	0,1	0,1	23,0	2,2	23,08
41	22,8	0,6	12,2	1,5	0,5	0,5	58,4	1,0	10,72
42	38,7	0,2	12,1	0,4	0,1	0,1	28,6	1,9	22,87

Tabela 9 - Resultados dos principais constituintes dos solos amostrados. O ferro e alumínio compõem a maior massa do Latossolo Vermelho e do Latossolo Vermelho-Amarelo.

	Elementos Ttraços (mg/kg)														
	As	**Ba**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Mn**	**Mo**	**Ni**	**P**	**Pb**	**Sr**	**V**	**Zn**	**Zr**
1A	29,1	17,9	<ld	22,8	90,9	26,6	94,8	<ld	16,2	360,0	<ld	15,0	199,8	41,9	469,6
3A	25,9	17,9	<ld	58,9	114,2	22,5	97,0	<ld	27,6	340,0	<ld	14,7	212,9	50,0	496,7
10A	29,0	14,4	<ld	32,9	118,1	31,1	95,0	<ld	24,2	390,0	<ld	12,7	215,8	48,0	502,2
11A	25,6	18,0	<ld	29,8	132,1	27,8	100,8	<ld	51,4	390,0	<ld	13,7	218,6	47,5	508,7
14A	29,9	13,9	<ld	30,0	112,3	36,7	94,8	<ld	32,5	340,0	<ld	12,0	222,9	43,6	508,3
15A	23,0	25,3	<ld	36,4	124,3	255,5	114,1	<ld	31,9	560,0	<ld	20,2	205,4	65,9	481,9
17A	21,4	22,0	<ld	19,4	133,3	37,6	103,2	<ld	24,5	400,0	<ld	16,0	207,5	58,5	490,9
20A	20,9	19,6	<ld	23,4	122,5	28,5	91,3	<ld	26,3	370,0	<ld	17,4	198,1	49,8	461,9
22A	35,8	28,4	<ld	26,1	122,1	37,0	103,5	<ld	29,4	480,0	<ld	18,6	203,3	64,9	482,3
1B	32,0	15,9	<ld	22,5	138,0	27,4	104,6	<ld	21,9	310,0	<ld	14,8	216,1	52,8	506,3
3B	33,3	14,8	<ld	23,7	143,6	26,0	100,8	<ld	22,4	280,0	<ld	14,6	219,6	102,7	508,9
10B	29,4	16,0	<ld	19,8	138,6	24,8	93,1	<ld	24,7	320,0	<ld	14,0	216,8	58,8	502,7
11B	32,3	12,2	<ld	22,6	142,9	24,6	85,8	<ld	20,9	310,0	<ld	12,3	222,0	73,1	535,3
14B	28,3	11,4	<ld	21,3	139,7	106,1	85,7	<ld	22,1	300,0	<ld	12,0	223,6	50,2	535,8
15B	32,4	15,5	<ld	20,7	143,5	21,5	85,7	<ld	20,9	310,0	<ld	14,6	219,3	56,0	531,2
17B	24,5	13,6	<ld	29,6	140,3	26,7	85,7	<ld	20,7	300,0	<ld	13,4	211,9	54,7	511,2
20B	28,5	13,2	<ld	25,9	137,2	15,2	85,5	<ld	21,7	280,0	<ld	13,5	208,9	48,7	486,0
22B	30,4	16,2	<ld	29,4	142,5	25,3	89,2	<ld	20,9	310,0	<ld	14,4	217,0	65,5	517,1
28	13,1	154,1	<ld	44,7	110,3	36,7	101,3	<ld	23,0	330,0	<ld	91,7	131,4	73,2	413,7
29	7,4	221,7	<ld	84,3	71,8	30,4	31,5	<ld	15,9	360,0	<ld	26,5	85,3	65,4	415,6
33	7,1	204,3	<ld	69,2	90,0	26,5	179,9	<ld	20,9	320,0	<ld	245,7	96,8	73,6	237,3
35	37,0	74,7	<ld	69,2	168,6	32,1	111,2	<ld	20,2	480,0	<ld	30,5	233,5	81,1	437,5
37	15,2	34,5	<ld	28,0	174,8	36,7	66,7	<ld	37,2	330,0	<ld	9,0	210,7	42,7	596,1
39	22,6	13,1	<ld	22,6	127,6	29,1	90,7	<ld	22,9	440,0	<ld	11,1	207,9	78,5	486,6
40	26,4	13,1	<ld	29,2	150,7	85,3	87,2	<ld	20,1	310,0	<ld	12,3	221,7	47,3	510,7
41	38,3	137,3	<ld	48,9	182,0	43,4	61,2	<ld	19,3	210,0	<ld	37,1	179,9	45,8	371,3
42	23,9	31,0	<ld	23,3	136,0	203,2	239,2	<ld	26,0	360,0	<ld	24,2	186,7	72,1	505,3

Tabela 10 - Resultados das análises dos elementos menores com uso de digestão por fusão a elevada temperatura.

5.2 Mapa da Extensão da Contaminação dos Solos

Para a confecção do mapa de extensão da contaminação dos solos os dados de campo de observações de fontes de contaminação e os dados de análises químicas dos solos (com ênfase nos metais mais comuns) foram espacializados. Cinco zonas distintas marcadas por diferentes contaminantes ou diferentes densidades de contaminação potencial foram discriminadas, incluindo a contaminação potencial por: fertilizantes e agroquímicos, efluentes domésticos, áreas de acumulação e remoção de resíduos sólidos, área com acumulação de resíduos em baixa densidade e área com acumulação vertical de grandes volumes de rejeitos.

O mapa da Figura 28 apresenta a espacialização das áreas de solos contaminados, sendo que a faixa alongada norte-sul situada na margem esquerda (leste) do córrego Cabeceira do Valo é uma área de contaminação por fertilizantes químicos solúveis, fertilizantes orgânicos e outros produtos químicos aplicados na agricultura intensiva irrigada. Não foram realizadas análises específicas, mas o histórico de uso da área, com produção agrícola de hortaliças a décadas corrobora a interpretação da presença deste tipo de contaminação.

Na faixa estreita situada no limite da ocupação de "Santa Luzia" com o Parque Nacional de Brasília existe acúmulo superficial de efluentes produzidos pela população residente que adentra na área da unidade de conservação ambiental. Mesmo sem a realização de análises específicas a observação de campo permite confirmar a presença deste tipo de contaminação.

Os demais tipos de contaminação que foram cartografados são diretamente decorrentes da acumulação permanente ou sazonal de resíduos sólidos de origem doméstica e de entulhos de obras civis.

A distinção destas três faixas foi baseada no volume, tempo de permanência dos resíduos (se permanente ou não) e nos tipos de resíduos (relação de entulho e lixo orgânico). A faixa "embargada" recebeu resíduos que foram posteriormente retirados (em função da proximidade com o Parque Nacional de Brasília). Áreas de acumulação distribuídas em locais onde atualmente está localizada a Cidade Estrutural (denominada de aterro antigo) receberam menor volume total de resíduos, uma vez que a operação àquela época era na forma de abertura de trincheiras, compactação dos resíduos e aterramento. Em muitas destas áreas atualmente dominam entulhos, pois o longo período desde a acumulação dos resíduos causou a decomposição total do lixo orgânico. Por fim, a poligonal considerada "lixo mais recente" foi dividida em duas faixas com diferente potencial de contaminação em função do volume acumulado e de ser atualmente ativa ou inativa.

6. CONTAMINAÇÃO ATMOSFÉRICA

A qualidade do ar é um dos aspectos do meio físico com a maior carência de dados e informações no Distrito Federal. A dificuldade de acesso a dados sobre a qualidade do ar no tempo e no espaço no território distrital se deve ao restrito número de estações de monitoramento e ao fato destas poucas estações apresentarem registros curtos e com inúmeras interrupções.

De certa forma, a falta de dados é decorrente da boa qualidade do ar na maior parte do tempo e na maior parte do território, uma vez que é uma região pouco industrializada, tem cidades pouco verticalizadas e ainda uma densidade de veículos menor que nos centros metropolitanos das maiores conurbações existentes no território nacional.

De forma geral, a preocupação com a qualidade do ar é uma questão local, sendo mais preocupante no período que inclui os meses de agosto e setembro, justamente o final da estação seca antes do início da temporada de chuvas.

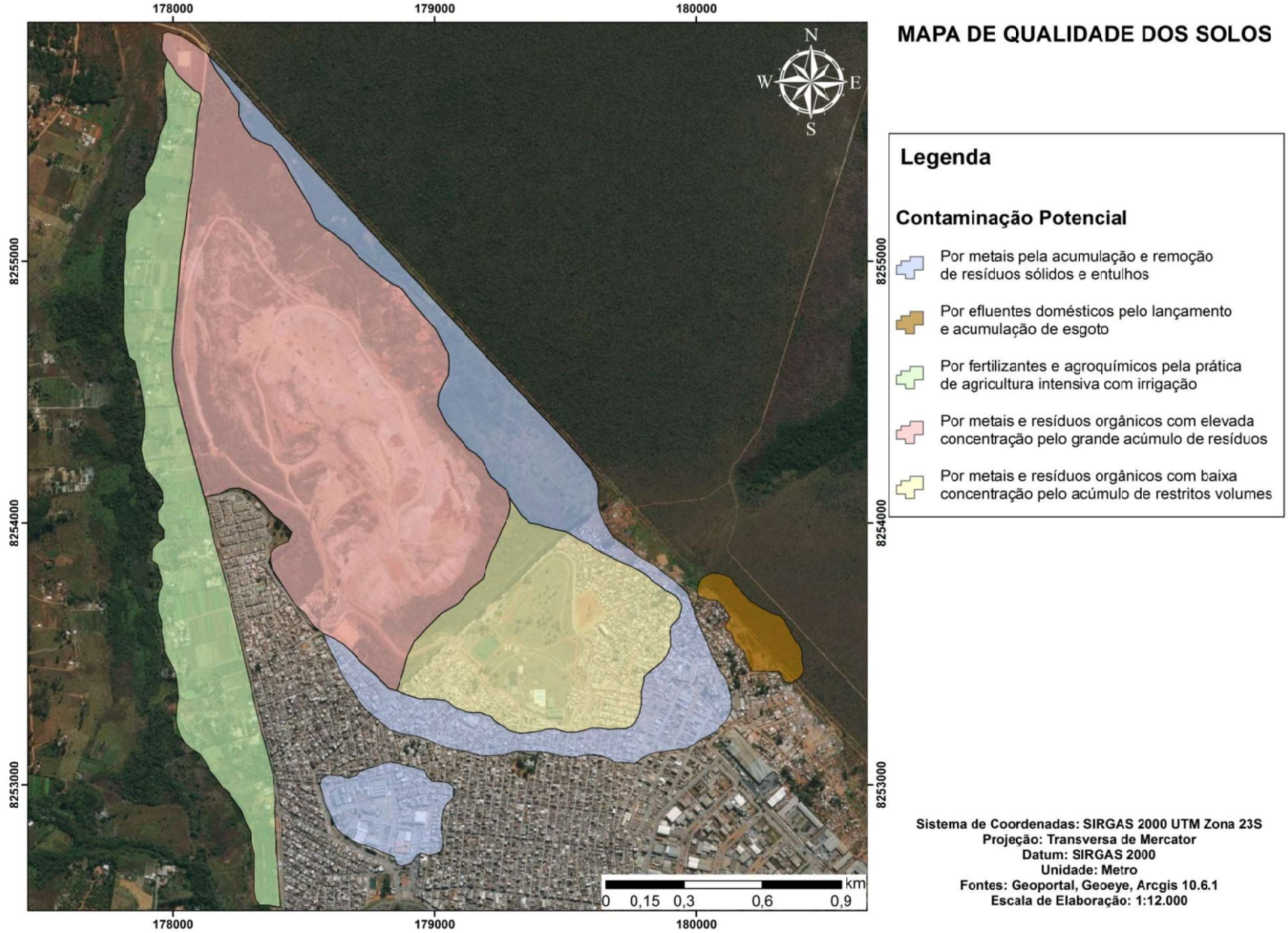


Figura 28 - Mapa da Distribuição das áreas com diferente potencial de contaminação. A confirmação da contaminação é feita por análises químicas específicas ou com base em informações qualitativas.

No Distrito Federal os pontos críticos com relação à qualidade do ar que foram monitorados, de forma intermitente incluem: a Rodoviária de Brasília, a região de central de Taguatinga e as localidades das fábricas de cimento referidas de forma genérica como "Região da Fercal" (Região Administrativa de Sobradinho II). Nas áreas urbanas a preocupação é vinculada à elevada densidade de veículos em certos horários do dia que podem ser responsáveis pelo aumento do particulado derivado de gases de combustão dos motores. Na região da Fercal o problema é vinculado com a operação das pedreiras (fonte de calcários para as fábricas) e dos fornos de produção do cimento que exalam grande volume de gases e poeira.

Além das duas fontes anteriormente enumeradas ainda existem duas outras que são significativas e afetam a atmosfera como um todo e não são apenas localizadas devido às atividades específicas: poeira de áreas expostas (pela agricultura, para expansão urbana, para realização de obras civis, dentre outras) e fumaça de queimadas florestais (infelizmente comuns nos meses de agosto e setembro) e de resíduos sólidos.

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução Conama 491/2018 contemplando os parâmetros: partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PI), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2) e fumaça. Os padrões estabelecidos são classificados em: primários e secundários. Os padrões primários de qualidade do ar referem-se às concentrações de poluentes que, uma vez ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Os padrões secundários de qualidade do ar são relacionados às concentrações de poluentes que resultam no mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, da fauna e flora, e dos materiais (Tabela 11).

Poluente	**Tempo de Amostragem**	**Padrão Primário ($\mu g/m^3$)**	**Padrão Secundário ($\mu g/m^3$)**
Partículas Totais em Suspensão	24 horas	240	150
	MGA	80	60
Dióxido de Enxofre (SO_2)	24 horas	365	100
	MAA	80	40
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	40000	40000
	8 horas	10000	10000
Ozônio (O_3)	1 hora	160	160
Fumaça	MAA	60	40
Partículas Inaláveis (PM10)	24 horas	150	150
	MAA	50	50
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	1 hora	320	190
	MAA	100	100

Tabela 11 - Padrões de qualidade do ar segundo a Resolução CONAMA nº 491/2018. MGA - média geométrica anual e MAA - média aritmética anual.

Com base nos dados obtidos pelas análises do material coletado nas estações, obtêm-se a concentração dos poluentes desejados em $\mu g/m^3$ e então se calcula o Índice de Qualidade do Ar (IQAr). O IQAr é um índice adimensional resultante do cálculo com a associação dos seguintes parâmetros: partículas inaláveis, partículas inaláveis finas, fumaça, ozônio, monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio. Este índice é utilizado para avaliar os efeitos da poluição sobre a saúde e bem estar da população, conforme Tabela 12, sendo a massa de atmosférico classificada como: boa, regular, inadequada, má ou péssima.

Qualidade do Ar	Índice	Descrição dos efeitos sobre a Saúde
Boa	0-40	Não há riscos à saúde.
Moderada	41-80	Pessoas de grupos sensíveis, como crianças e idosos com doenças respiratórias e cardíacas, podem apresentar sintomas como tosse e cansaço. A população em geral não é afetada.
Ruim	81-120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças e idosos com problemas respiratórios e cardíacos) podem apresentar efeitos mais severos à saúde.
Muito Ruim	121-200	Toda a população pode apresentar agravamento de sintomas como tosse, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves na população sensível.
Péssima	> 200	Toda a população pode apresentar riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Tabela 12 - Índice de qualidade do ar (IQAr) e efeitos sobre a saúde humana (CETESB, 2013).

A título de exemplo são apresentados dois gráficos de distribuição de dados de qualidade do ar no Distrito Federal (Figuras 29 e 30).

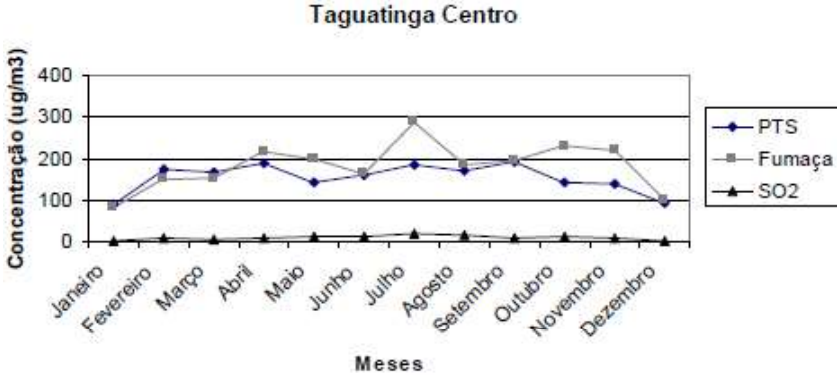


Figura 29 - Distribuição mensal da poluição atmosférica no ano de 2008 no Centro da cidade de Taguatinga. Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008).

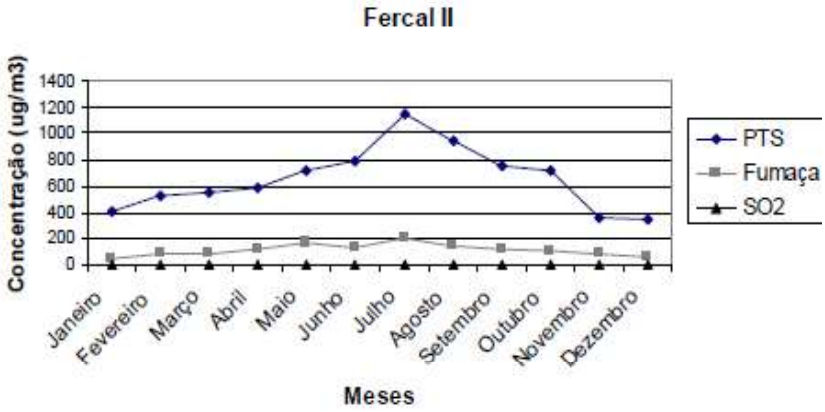


Figura 30 - Variação de componentes indicadores de qualidade do ar nas adjacências da fábrica de cimento Planalto (Ciplan). Fonte: IBRAM/SEDUMA, (2008).

No centro da cidade de Taguatinga, conhecido como um dos trânsitos de veículos mais intensos do Distrito Federal os valores de particulados totais em suspensão alcançam o valor máximo de 200 μg/cm^3, sendo que no ano de 2008 o indicador de fumaça alcançou o valor de 300 μg/cm^3 no mês de julho. Na região da Fercal nas proximidades da fábrica de cimentos Ciplan o PTS alcança 1200 μg/cm^3 sendo que os índices de fumaça e SO_2 permanecem similares ao da cidade Taguatinga, o que indica que os valores de particulados totais em suspensão são controlados pela operação da fábrica e não por queimadas ou trânsito de veículos.

Quatro tipos de poluentes atmosféricos são produzidos em grande escala na área do lixão e adjacências, quais sejam:

- Particulados atmosféricos derivados da suspensão de partículas (argila, silte e fragmentos amorfos) a partir de áreas expostas e da operação do Moinho de Resíduos, sendo elevadas pela ação de ventos e ao longo do trajeto de veículos (em estradas não pavimentadas);
- Fumaça e gases com elevado potencial de enriquecimento em Dióxido de Enxofre (SO_2) e Monóxido de Carbono (CO) por serem produzidos majoritariamente pela combustão de óleo diesel de máquinas e caminhões que trafegam de forma contínua na área da atual Unidade de Recebimento de Entulhos - URE e na cidade Estrutural (para acesso à URE);
- Fumaça de queima de massa florestal e áreas verdes e de queima de resíduos sólidos que são acumulados indistintamente em locais inadequados na periferia do lixão e da própria área urbana da Cidade Estrutural;
- Gases de Efeito Estufa - GEE (principalmente metano - CH_4) derivados da metanogênese oriunda da decomposição dos resíduos orgânicos aterrados no corpo principal do lixão mais recente (depositado a partir de 1995).

Na região da Cidade Estrutural e nas adjacências do antigo Lixão não existem dados disponíveis de monitoramento da qualidade do ar, embora seja uma região que particularmente apresente problemas associados a esta questão ambiental.

Com relação aos gases de efeito estufa não existem dados disponíveis de monitoramento. Apenas um trabalho que apresenta resultados de medições de gases foi encontrado na literatura. O trabalho de Del'Rey (2020) apresenta os resultados da estatística de medições realizadas em queimadores de gases que na prática são drenos verticais da fração gasosa produzida pela decomposição dos resíduos orgânicos. A Tabela 13 apresenta a síntese dos resultados do referido trabalho a partir da medição em 70 pontos de queima de gases (para a medição, o fogo foi extinto e se aguardou 5 horas antes da leitura). A medição da concentração de metano e dióxido de carbono foi realizada com um instrumento portátil da marca Land Tec modelo GEM 5000.

Nenhum dado de vazão dos gases (volume por tempo) foi encontrado, sendo que para fins de avaliação do potencial de geração de energia pela combustão dos gases este dado é fundamental.

Tipo de Gás	Concentração Mínima	Concentração Máxima	Concentração Média	Desvio padrão
CH_4	1,9	57,9	38,9	15,9
CO_2	0,6	58,4	33,4	16,3

Tabela 13 - Estatística de variação de metano e gás carbônico médio em 70 drenos verticais de gás situados na porção elevado do maciço de resíduos. Valores em porcentagem por volume (% por volume). Medições realizadas em abril de 2019. Fonte Del'Rey (2020).

Para minimizar os efeitos dos poluentes na atmosfera local e minimizar eventuais problemas de saúde à população local as seguintes práticas são desenvolvidas: queima dos gases nas saídas dos drenos verticais de gás e aspersão de água nas áreas internas do lixão.

Atualmente está em desenvolvimento um projeto de pesquisa no âmbito do programa de Pesquisa & Desenvolvimento da Eletronorte / Companhia Energética de Brasília (CEB), que pretende avaliar o potencial de geração de energia pela combustão dos GEEs derivados do antigo aterro. Como uma das metas do referido projeto se destaca o dimensionamento do volume dos resíduos aterrados e a quantificação da produção de gases atualmente eliminados pelos drenos.

Para a completa caracterização dos poluentes atmosféricos na região é fundamental que uma estação de monitoramento seja instalada para medição contínua de PTS, PI e fumaça, além do monitoramento da saída dos gases dos drenos verticais.

7. MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE RESÍDUOS

7.1 Caracterização dos Tipos de Resíduos

A área do Lixão da Estrutural, bem como a atual área urbana da Cidade Estrutural representam locais de acumulação de resíduos há mais de 50 anos.

Durante as escavações para a instalação dos poços de monitoramento no âmbito deste projeto comumente foram interceptados aterros em maior ou menor espessura.

Durante a tentativa de instalação do Poço LX16 próximo à Administração Regional da Estrutural foi possível confirmar a existência de mais de 20 metros de entulho de obras com grandes fragmentos de concreto, blocos pré-moldados, restos de azulejos dentre outros. Nesta mesma região a Escola Classe foi interditada em função da acumulação de gás nas salas de aulas gerado pela decomposição de resíduos. Estes dados indicam a ampla área impactada pela disposição de rejeitos, não apenas dentro dos limites da poligonal controlada pelo Serviço de Limpeza Urbana, mas também em suas adjacências (incluindo áreas urbanas já consolidadas).

Na área urbana a escavação de trincheiras relativamente pequenas (de 2 m de comprimento por 1 m de largura por 1 m de profundidade) mostra a presença de diferentes tipos de materiais, incluindo: plástico, papel / papelão, tecido, metal e vidro. Todos os fragmentos vêm misturados em uma matriz composta por diferentes tipos de solos (Figura 31). Na área do lixão mesmo em porções que tiveram os resíduos removidos por determinação legal, ainda é possível observar diferentes tipos de resíduos a pequenas profundidades (Figura 32).

Figura 31 - Resíduos observados em trincheira rasa aberta na área urbana da Cidade Estrutural. Notar a ampla predominância de plástico.

Figura 32 - Resíduos expostos em área que foi gradeada para implantação de experimento de fitorremediação.

No maciço do aterro mais recente, em suas porções com maior espessura de resíduos acumulados é difícil se ter uma definição exata das proporções dos diferentes tipos. Entretanto, a observação de locais que tiveram remoção de resíduos em obras de retaludamento, na construção de trincheiras para contenção de chorume, nos aterros das vias de acesso é possível verificar a seguinte proporção das classes de resíduos: entulho > plástico > tecido > madeira > vidro > metais. Estes materiais estão sempre envoltos por diferentes proporções de terras de origens distintas. A porção orgânica, de forma geral, já foi parcial ou totalmente decomposta.

As proporções de classes de resíduos mudam no tempo e no espaço a partir de diferentes parâmetros. No início de operação da área os resíduos domésticos ricos em matéria orgânica predominavam. Em outros momentos materiais oriundos de bota-fora de obras de infraestrutura e outras obras civis passaram a dominar. Atualmente a área é operada como uma Unidade de Recebimento de Entulho e resíduos de podas, entretanto, é possível se observar diferentes tipos de resíduos, incluindo plásticos, madeira e tecidos.

Outro ator que influencia historicamente nas classes de resíduos acumulados é a "cultura da reciclagem". A reciclagem de materiais potencialmente aproveitáveis sempre existiu. Contudo, este cenário modificou de forma mais intensiva a partir dos anos 2000, quando por "conscientização" da população ou por "necessidade" dos catadores e cooperativas de catadores, grande parte dos resíduos secos passaram a ser retirados antes de serem acumulados no aterro.

O volume de material acumulado também sofreu mudanças radicais durante o tempo de atividade do Lixão. Inicialmente se aplicava um método de aterramento por trincheiras em que os resíduos eram depositados e compactados em pequenas espessuras (~5 metros) e posteriormente aterrados. Quando as áreas se tornaram mais limitadas, em função da ocupação urbana, se optou pela acumulação vertical dos resíduos.

Na operação por acumulação na vertical ocorreram vários momentos de aterramento e nova disposição dos resíduos, de forma que atualmente existem superfícies compactadas e impermeabilizadas no interior do maciço de resíduos.

O mapa da Figura 33 mostra a distribuição dos resíduos. De forma, geral há muita variação e heterogeneidade dos resíduos, mas são observadas diferentes proporções contendo blocos de concreto e outros restos de obras, plástico, papelão, vidro, ferro e matéria orgânica em diferentes estágios de decomposição (inclusive em condições redutoras, e em fase metanogênica no interior do maciço mais espesso de resíduos).

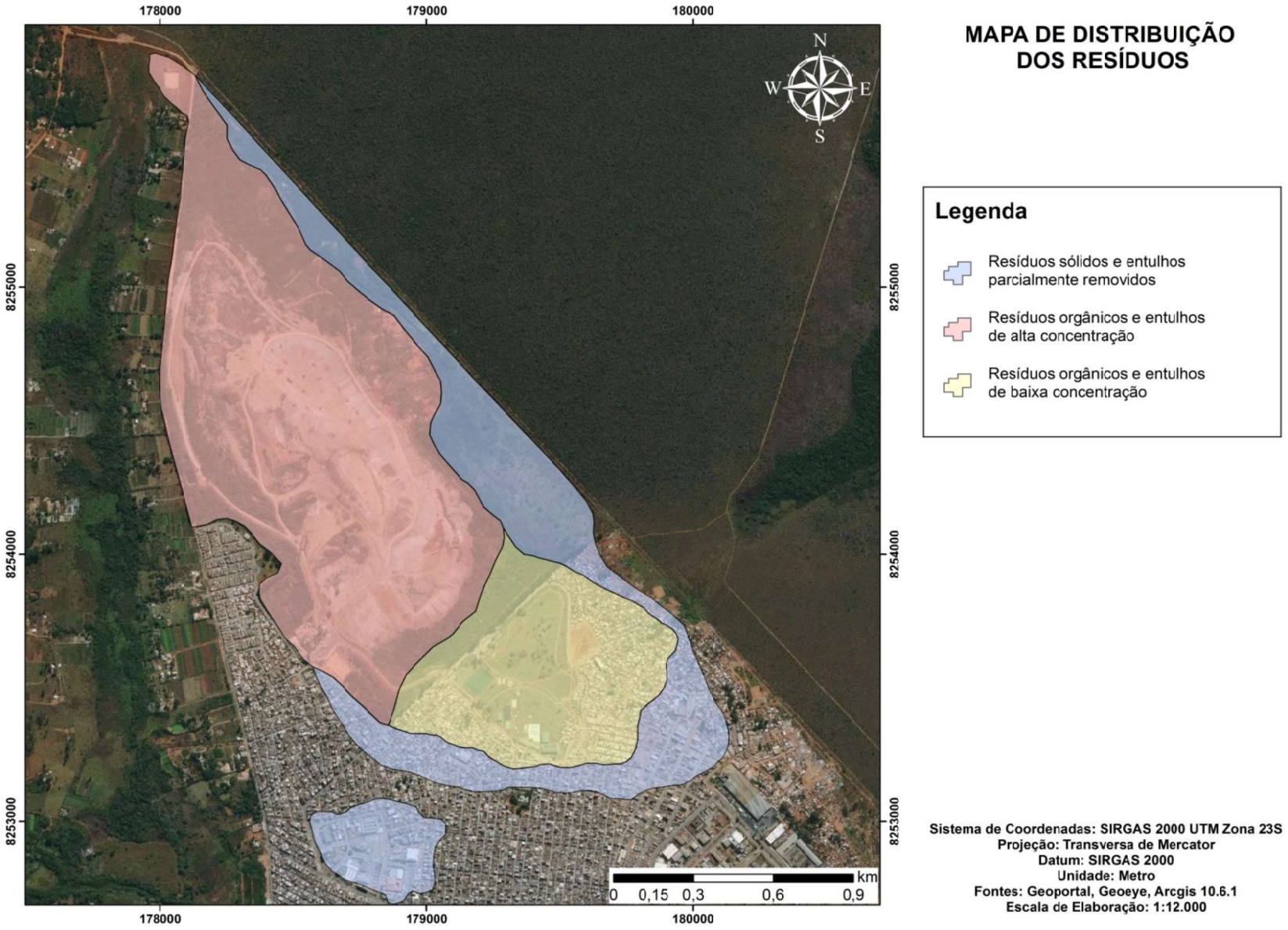


Figura 33 - Distribuição dos resíduos na área do Lixão, incluindo áreas de acumulação histórica e área de acumulação mais recente.

8. DADOS PARA ALIMENTAÇÃO DOS MODELOS DE FLUXO

8.1 Condutividade Hidráulica da Zona Não Saturada

O mapa de solos da área adjacente ao Lixão da Estrutural apresenta três classes de solos caracterizadas como Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Gleissolo Háplico. Estes solos apresentam como feições similares sua textura muito argilosa e sua estruturação granular a grumosa, de forma que compõem coberturas similares em função de seu funcionamento hídrico. Desta forma, foram realizados cinco ensaios de infiltração *in situ* para a determinação da sua condutividade hidráulica em superfície e até 200 cm, o que representa a porção superficial da zona não saturada do aquífero freático da região.

Os ensaios de infiltração correspondem a uma medida pontual que é extrapolada para as áreas adjacentes com características pedológicas, geológicas e de uso do solo semelhantes. Em geral, os métodos de ensaios de infiltração, como é o caso da condutividade hidráulica vertical (Kv), são desenvolvidos a partir da medição da quantidade de água percolada em um determinado intervalo de tempo. O parâmetro hidrodinâmico condutividade hidráulica apresenta grande relevância por ser um dos principais fatores de caracterização dos aquíferos. Em especial, os ensaios de infiltração *in situ* baseiam-se nos princípios da Lei de Darcy para o fluxo laminar do movimento da água no solo.

Ao realizar um ensaio para obtenção dos valores de condutividade hidráulica deve-se estar atento para alguns fatores que podem interferir no comportamento da movimentação da água no meio e, consequentemente em suas medições, tais como: qualidade da água; viscosidade da água; textura, estrutura e consistência do solo; ação de microrganismos no solo e presença de ar nos poros.

Os métodos têm sua aplicação variando em conformidade com a natureza do meio testado, tipo de prospecção e objetivo. Conforme Souza (2001) e Fiori (2010) são exemplos de ensaios de campo: ensaio de furo de trado em presença de lençol freático; ensaio de furo de trado em ausência de lençol freático (*Open End Hole*); ensaio de anéis concêntricos e ensaio em poços de monitoramento.

Neste estudo, os testes foram realizados considerando pontos estratégicos com relação à distribuição das classes de solos, condições geológicas e geomorfológicas, além da situação natural dos locais analisados. Os valores de Kv foram adquiridos utilizando-se dois dos métodos citados anteriormente para identificação dos valores de Kv: anéis concêntricos, com análise de Kv na superfície e *Open End Hole*, com análise de Kv em profundidade.

Os estudos da condutividade hidráulica distinguem medições quanto à direção do fluxo, vertical e horizontal, e quanto à carga, que pode ser constante ou variável. Os dois tipos de ensaios desenvolvidos no presente estudo buscam valores de condutividade hidráulica vertical utilizando carga variável.

O ensaio dos anéis concêntricos utiliza um bloco de dois anéis metálicos soldados concentricamente com 25 cm de altura, 45 cm de diâmetro no anel externo e 35 cm de diâmetro no anel interno, como pode ser visto na Figura 34.

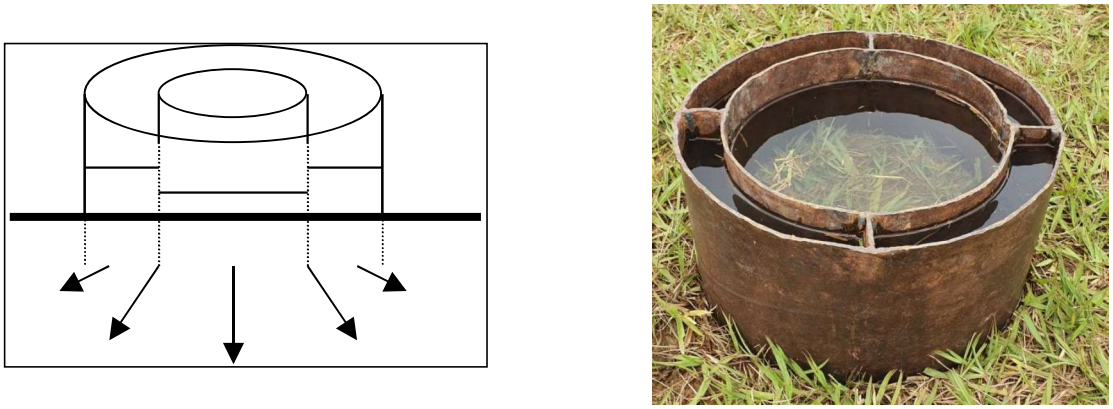


Figura 34 - Ensaio de infiltração *in situ* com o método dos anéis concêntricos.

O procedimento de campo envolve, primeiramente, a cravação dos anéis na porção superficial do solo. Essa cravação é necessária para evitar que haja vazamento pela lateral do cilindro interno. Esse método busca impedir a tendência de fluxo na direção horizontal ao propiciar a criação de uma barreira de solo saturado decorrente da necessidade de estabilização do nível de água do anel externo antes que se abasteça o anel interno. Essa técnica utiliza a coluna inicial e final de água e o tempo de infiltração (conforme Eq. 3). Após a aplicação dessa fórmula, são obtidos os valores de K apresentados na Tabela 14.

$$K = \mu \times \frac{I}{\Delta t} \times \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:
I - Profundidade de cravação (mm);
h_0 - Coluna d'água inicial (mm);
h - Coluna d'água final (mm);
Δt - Tempo decorrido para o rebaixamento entre h_0 e h (min);
μ - Fator de transformação de unidades (de mm/min para m/s = 1/10000).

O método denominado O*pen End Hole* consiste na perfuração, com trado, de quatro furos, dispostos em uma área quadrada com um metro de aresta, ou alinhados, que variaram em profundidade de 50, 100, 150 e 200 cm. É necessário ressaltar que por vezes não foi possível executar todos os furos em determinados pontos e que alguns furos tiveram uma pequena variação quanto à profundidade em função de dificuldades operacionais, como interceptação de linhas de pedra ou de horizontes impenetráveis.

De acordo com a Figura 35, depois da execução dos furos são cravados com marreta de borracha tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, objetivando revestir as paredes do poço. Neste estudo, para a perfuração a trado foi utilizado o diâmetro de 100 mm, o que resulta em um

espaço anelar de 50 mm, folga suficiente ao controle da cravação. Desta forma, garante-se que a água de enchimento dos tubos de revestimento não vaze e se infiltre através das paredes do furo. Também, evita-se o uso de força para cravação, manobra que implica quebra da estrutura do solo e polimento das paredes do furo.

	Coord. UTM	Observações	I (mm)	Ti	Mi (cm)	Tf (seg)	Mf (cm)	K m/s
Ponto 1	180141 8254167	Transição LVA/Glei; Furo 100 cm: condições de umidade próximas ao limite de saturação (água visível na base do furo no decorrer do ensaio); 20 minutos de estabilização.	55	0	3,0	3000	13,3	$1,79 \times 10^{-5}$
Ponto 2	178983 8254913	Ensaio em LVA. Estrutura superficial comum pequena granular (entre grumosa e granular); Muita atividade de raízes, inclusive em maiores profundidades (200 cm). Cerrado em recuperação (área queimada)	100	0	4,0	179	11,4	$6,24 \times 10^{-4}$
Ponto 3	178253 8255701	Ensaio em LVA. Estrutura superficial muito comum pequena grumosa; Muita atividade de raízes nos primeiros 50 cm. Cerrado do tipo campo sujo	60	0	3,1	562	15,5	$1,62 \times 10^{-4}$
Ponto 4	178044 8254431	Ensaio em LVA próximo a lagoa de chorume (beira da estrada). Primeiros 7 cm de material muito compacto	50	0	3,4	3013	15,4	$2,13 \times 10^{-5}$
Ponto 5	178439 8253941	Ensaio em LV; Superfície gramada. Horizonte A com 16 cm (coloração preto-amarronzada)	50	0	0,044	3000	14,2	$1,65x\ 10^{-5}$

Tabela 14 - Valores de condutividade hidráulica na superfície pelo método dos anéis concêntricos (m/s). I - profundidade de cravação dos anéis; Ti - tempo inicial; Tf - tempo final; Mi - medida inicial; Mf - medida final da coluna d'água no anel central e K - condutividade hidráulica vertical na superfície.

Figura 35 - Ensaio de infiltração *in situ* com método *Open End Hole*.

O passo subsequente consiste em preencher com água a um limite de altura inicial da coluna d'água, h_0, em um tempo também inicial, t_0. Após certo tempo, t, a partir do início do processo de infiltração, fez-se uma medição da coluna de água final, h, para cada um dos tubos cravados no local do ensaio. Assim, a estimativa de Kv é feita pela aplicação desses dados na Eq. 4, e os resultados apresentados na Tabela 15.

$$Kv = 2{,}303 \times \left(\frac{R}{4\Delta t}\right) \times \left[\log\left(\frac{h_0}{h}\right)\right] \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:
R = raio do tubo (m),
h_0 = coluna d'água inicial (m),
h = coluna d'água final (m),
Δt = tempo decorrido para o rebaixamento entre h_0 e h (seg).

Ponto 1						
Prof.	**H (cm)**	**Ti (seg)**	**Mi (cm)**	**Tf (seg)**	**Mf (cm)**	**K (m/s)**
50	50,50	0,00	5,40	3000,00	16,20	$5{,}7 \times 10^{-7}$
100	101,00	12,22	5,90	3022,00	8,40	$5{,}5 \times 10^{-8}$
Ponto 2						
Prof.	**H (cm)**	**Ti (seg)**	**Mi (cm)**	**Tf (seg)**	**Mf (cm)**	**K (m/s)**
50	53,00	0,00	7,70	1200,00	40,40	$6{,}6 \times 10^{-6}$
100	106,00	12,95	7,30	3000,00	18,90	$2{,}6 \times 10^{-7}$
150	149,00	24,50	6,60	3022,00	27,90	$3{,}3 \times 10^{-7}$
200	202,00	34,96	5,70	3040,00	7,80	$2{,}2 \times 10^{-8}$
Ponto 3						
Prof.	**H (cm)**	**Ti (seg)**	**Mi (cm)**	**Tf (seg)**	**Mf (cm)**	**K (m/s)**
50	52,40	0,00	5,80	2100,00	40,00	$3{,}9 \times 10^{-6}$
50	52,40	0,00	5,80	3015,00	48,80	$5{,}3 \times 10^{-6}$
100	108,50	11,00	6,60	3033,00	12,70	$1{,}2 \times 10^{-7}$
150	150,40	22,00	6,40	3052,00	27,80	$3{,}3 \times 10^{-7}$
200	205,90	32,21	5,90	3070,00	9,40	$3{,}6 \times 10^{-8}$
Ponto 4						
Prof.	**H (cm)**	**Ti (seg)**	**Mi (cm)**	**Tf (seg)**	**Mf (cm)**	**K (m/s)**
50	57,50	0,00	3,20	3000,00	23,80	$9{,}9 \times 10^{-7}$
100	111,30	13,00	6,60	3013,00	7,70	$2{,}2 \times 10^{-8}$
150	151,50	21,00	6,20	3033,00	16,80	$1{,}5 \times 10^{-7}$
200	206,00	32,00	6,10	3045,00	8,20	$2{,}1 \times 10^{-8}$
Ponto 5						
Prof.	**H (cm)**	**Ti (seg)**	**Mi (cm)**	**Tf (seg)**	**Mf (cm)**	**K (m/s)**
50	55,00	0,00	6,10	3000,00	18,10	$5{,}8 \times 10^{-7}$
100	108,50	11,00	5,60	3026,00	36,50	$7{,}4 \times 10^{-7}$
150	151,00	24,00	5,40	3044,00	11,60	$9{,}0 \times 10^{-8}$
200	205,50	42,00	6,80	3059,00	6,90	$1{,}0 \times 10^{-9}$

Tabela 15 - Valores da Condutividade Hidráulica por método *Open End Hole* (m/s). A numeração dos pontos relaciona-se com a apresentada para os ensaios com Anéis Concêntricos e, portanto, as coordenadas UTM são as mesmas. Ti - tempo inicial; Tf - tempo final; Mi - medida inicial da coluna d'água; Mf - medida final da coluna d'água no tubo de PVC e K - condutividade hidráulica vertical.

8.1 Condutividade Hidráulica da Zona Saturada

Para a determinação da condutividade hidráulica da zona saturada foram realizados ensaios do tipo Slug Test em dezesseis poços de monitoramento instalados pelo presente projeto. Não foram utilizados poços existentes, uma vez que os perfis construtivo e descritivo dos poços não são conhecidos.

Para a elevação instantânea da coluna de água no poço, não foi utilizada uma barra impermeável de volume conhecido (*slug* em inglês), mas um volume de água que foi adicionado de forma rápida no interior da tubulação de revestimento / filtro.

Slug Tests - Base Teórica

De forma sucinta, este teste consiste na elevação do nível d'água de um poço seguido da observação das condições para recuperação do nível estático inicial. As técnicas incluem o lançamento de objetos ou certa quantidade de água, sempre de volume conhecido (Figura 36). A avaliação é feita pela interpretação de uma curva do tipo Rebaixamento *versus* Tempo construída com medidas regulares de nível dinâmico, seja com medidores manuais de nível ou com transdutores de pressão acoplados a computadores.

Os dados de campo podem ser aplicados em diferentes equações matemáticas. Os principais métodos usados para tratamento dos dados de campo incluem: i) Bouwer & Rice, ii) Hvorslev e iii) Vazão (Fiori, 2010), descritos a seguir.

Figura 36 - Adição de água ao poço a fim de se elevar o nível estático para averiguação das condições de recuperação.

Método de Bouwer & Rice

Este método pode ser utilizado tanto para aquíferos livres quanto para aquíferos confinados, desde que a base da camada confinante esteja consideravelmente acima da seção de filtro do poço (Fiori, 2010). A componente radial da condutividade hidráulica (Kr) é obtida pela Eq. 5:

$$K_r = -\frac{r_c^2 \ln\left(\frac{Re}{r_w}\right)}{2L_e}\frac{1}{t}\ln\frac{H_t}{H_0} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde (Figura 2):
rc = raio do revestimento (m);
Re = raio efetivo de dissipação da carga hidráulica (m);
rw = raio efetivo do filtro ou raio de perfuração do poço (m);
Le = comprimento da seção de filtro (m);
t = tempo (s);
H0 = elevação no tempo t = 0 (m)
Ht = elevação no tempo t = t (m)

A determinação de Re não é trivial. Empiricamente, adotam-se valores de 3 *x* rw, 5 *x* rw e 7 *x* rw (Fiori, 2010).

Segundo Fiori (2010), esta solução pressupõe que o aquífero é livre (ou semiconfinado com contribuição do aquitarde) com extensão infinita, homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme. Além disso, o lençol freático é horizontal antes do teste e a mudança da carga hidráulica no início do teste é instantânea. Ainda, considera-se que a inércia da coluna d'água e as perdas não lineares são insignificantes; o poço é totalmente ou parcialmente penetrante; e seu armazenamento não é desprezível. Finalmente, o fluxo para o poço está em um estado estacionário e não há fluxo acima do lençol freático. A Figura 37 ilustra os parâmetros e as condições de contorno deste método.

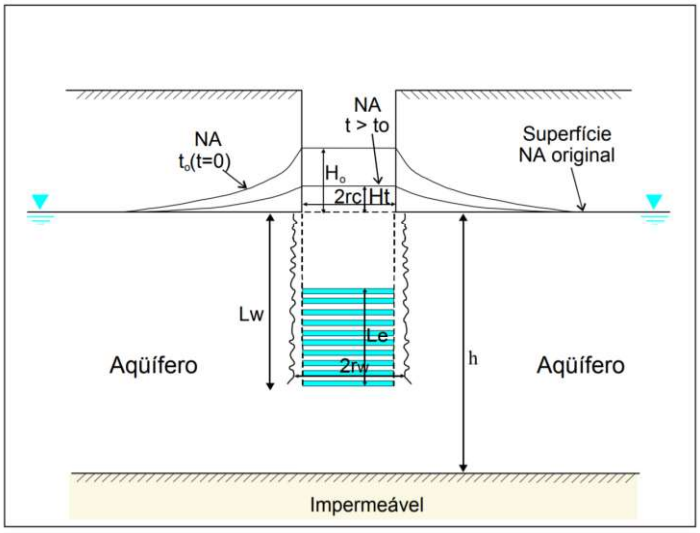


Figura 37 - Ilustração esquemática do teste tipo *Slug* com parâmetros geométricos utilizados na análise da condutividade hidráulica pelo método de Bouwer & Rice (1976). Poço parcialmente penetrante. Extraído de Pede (2004).

Método de Hvorslev

Segundo Fiori (2010), este método pode ser aplicado para aquíferos confinados e livres, homogêneos, isotrópicos, de espessura uniforme e baixo gradiente hidráulico. A condutividade hidráulica é obtida pela Eq. 6:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{Le}{R}\right)}{2L_e T_L} \text{ (Equação 6)}$$

Onde:
Kr = componente radial da condutividade hidráulica (m/s);
rc = raio do revestimento (m);
Le = comprimento da seção de filtro (m);
R = raio contínuo de interferência do poço de observação (m);
TL = π2/FK, onde FK = π2*(dr/dt);
TL = tempo para 37% de recuperação (s).

Este método pressupõe que o aquífero é semiconfinado, não drenante, com extensão lateral infinita, homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme. Além disso, considera-se que o lençol freático é horizontal antes do teste e a injeção ou retirada de água resulta em uma mudança instantânea no nível d'água. Assume-se que a inércia da coluna d'água e as perdas não lineares são insignificantes e o poço é considerado de largura infinitesimal e totalmente ou parcialmente penetrante. Finalmente, o fluxo em direção distante do poço é horizontal (Fiori, 2010). Na prática, o fator R refere-se ao raio da perfuração rw, onde o espaço anelar entre o tubo de revestimento e o furo é preenchido por pré-filtro.

Método da vazão

Segundo a "função da vazão", a condutividade hidráulica da zona saturada pode ser determinada pela Eq. 7:

$$K = Q/5.5*\Delta h*r \text{ (Equação 7)}$$

Onde:
K = condutividade hidráulica (m/s);
Q = vazão medida a partir do volume de água lançado e tempo de ensaio (m^3/s);
5.5 = constante empírica;
Δh = variação da carga hidráulica inicial e final do teste (m);
r = raio do revestimento do poço de observação (m).

Os valores obtidos pelo método da vazão são, em geral, superestimados. Sua aplicação restringe-se a casos em que as características construtivas de um poço são desconhecidas.

Slug Tests - Resultados e Interpretações

A Tabela 16 traz a base de dados gerada durante a realização dos ensaios e o Apêndice 3 o comportamento da variação dos níveis durante a recuperação da carga hidráulica original. A

decisão dos volumes de água adicionados em cada poço foi baseada no perfil descritivo do poço (presença de areia, entradas d'água e vazão potencial) e na elevação do nível freático. O volume variou de 12 até 50 litros. O lançamento da água foi feito com uso de um funil que permitiu a introdução da água em no máximo 15 segundos.

Os resultados de acordo com diferentes métodos são apresentados na Tabela 17. De acordo com estes resultados os aquíferos locais podem ser subdivididos em dois conjuntos: i) condutividade hidráulica moderada (da ordem de 10^{-6} m/s) e ii) condutividade hidráulica baixa (da ordem de grandeza de 10^{-7} m/s). A classificação de moderada e baixa segue o critério de Freeze & Cherry (1979).

O método da vazão apresenta valores elevados, pois não utiliza nenhum dado construtivo dos poços. Por isso neste trabalho optou-se por não utilizar estes resultados inclusive porque os valores obtidos não são compatíveis com os tipos de aquíferos e materiais observados durante a perfuração e instalação dos poços.

Poço	Data	NE (m)	Hora Início	Hora Final	Volume (litros)	Ascensão (m)	Recuperação
Lx 01	11/07/2020	4,735	11:50:00	12:01:00	30	1,70460	99,05%
Lx 02	11/07/2020	2,905	11:38:00	12:10:00	20	2,17416	100,17%
Lx 03A	04/08/2020	8,150	14:40:00	16:50:00	25	0,95600	99,42%
Lx 04	11/07/2020	1,690	10:40:00	11:21:00	12	1,14469	100,00%
Lx 04A	04/08/2020	1,170	16:12:00	16:40:00	10	1,01700	100,43%
Lx 05	11/07/2020	3,405	10:15:00	11:15:00	25	2,55510	98,68%
Lx 06	04/08/2020	6,170	12:00:00	13:16:00	30	2,73300	100,15%
Lx 07	11/07/2020	12,310	13:02:00	15:13:00	50	4,33050	98,46%
Lx 08	11/07/2020	13,665	13:28:00	18:48:00	50	4,59206	98,18%
Lx 09	11/07/2020	11,560	15:55:00	17:48:00	25	2,52410	99,53%
Lx 10	11/07/2020	8,670	16:31:00	18:32:00	30	2,50571	98,90%
Lx 12	12/07/2020	7,425	09:07:00	09:25:00	30	2,80141	100,00%
Lx 13	12/07/2020	7,750	08:22:00	08:37:00	30	2,34623	99,94%
Lx 14	04/08/2020	9,685	08:39:00	10:10:00	50	2,71000	98,99%
Lx 15	04/08/2020	8,200	10:25:00	13:40:00	25	3,45000	99,27%
Lx 19	11/07/2020	5,050	08:10:00	09:44:00	50	4,97860	94,26%

Tabela 16 - Dados base para a realização dos ensaios hidráulicos tipo *Slug test* nos poços de monitoramento instalados no âmbito do presente projeto.

	Filtro (m)	Duração	Tempo (s)	Método Vazão	Hvorslev	Bouwer & Rice
Lx 01	8,0	00:09:56	596	1,06E-04	3,80E-06	2,95E-06
Lx 02	8,0	00:31:00	1860	1,77E-05	3,34E-06	2,60E-06
Lx 03A	6,0	02:09:37	7777	1,20E-05	3,87E-07	2,99E-07
Lx 04	8,0	00:41:00	2460	1,53E-05	2,50E-06	1,94E-06
Lx 04A	6,0	00:27:51	1671	2,11E-05	4,05E-06	3,13E-06
Lx 05	8,0	00:59:58	3598	9,73E-06	9,04E-07	7,02E-07
Lx 06	18,0	01:14:03	4443	8,84E-06	4,08E-07	3,25E-07
Lx 07	6,0	02:09:45	7785	5,31E-06	3,26E-07	2,52E-07
Lx 08	6,0	05:18:57	19137	2,04E-06	1,40E-07	1,08E-07
Lx 09	6,0	01:52:01	6721	5,27E-06	5,00E-07	3,87E-07
Lx 10	8,0	01:58:57	7137	6,00E-06	3,34E-07	2,59E-07
Lx 12	6,0	00:16:15	975	3,93E-05	6,65E-06	5,14E-06
Lx 13	6,0	00:14:18	858	5,33E-05	6,59E-06	5,10E-06
Lx 14	8,0	01:31:38	5498	1,20E-05	5,04E-07	3,92E-07
Lx 15	6,0	03:13:43	11623	3,92E-06	2,35E-07	1,81E-07
Lx 19	6,0	01:33:13	5593	6,43E-06	4,65E-07	3,60E-07

Tabela 17 - Resultados dos ensaios hidráulicos pelos métodos da Vazão, Hvorslev e Bouwer & Rice.

Os resultados pelos métodos de Hvorslev e Bouwer & Rice apresentaram resultados na mesma ordem de grandeza sendo que o primeiro resulta em valores ligeiramente mais elevados, entretanto, estes resultados deverão ser utilizados para alimentar os modelos hidráulicos para previsão do tempo de trânsito da pluma.

8.2 Geologia e Hidrogeologia

Até o início do desenvolvimento do presente projeto a geologia de toda a área pesquisada era interpretada como associada à Formação Ribeirão do Torto do Grupo Paranoá de idade Mesoproterozoica (com deposição a cerca de 1 bilhão de anos) (Campos, 2012). Este cenário do conhecimento geológico da área é associado à restrição de exposição rochosa e à inexistência de poços tubulares profundos (em função da própria contaminação potencial dos aquíferos).

Entretanto, com o desenvolvimento dos estudos atuais, principalmente com a construção dos poços de monitoramento e descrição detalhada das amostras de calha, para a composição do perfil pedo-geológico, foi possível atualizar o mapa geológico da região do Lixão da Estrutural e áreas adjacentes.

Na descrição dos Poços LX 3A, LX 11, LX 12, LX 13 e LX 14 é possível observar os seguintes materiais: siltito friável amarelado, areia média a grossa com grãos arredondados, quartzito grosso a muito grosso, silicificado, pouco fraturado e intercalações de quartzitos e

metassiltitos acinzentados. Estes materiais correspondem ao topo da Formação Ribeirão Piçarrão, que aflora em inúmeras "janelas estruturais" na porção central da Depressão do Paranoá, como por exemplo: na região da Granja do Torto, na porção elevada do Eixo Monumental incluindo áreas dos setores Sudoeste, Memorial JK e Noroeste, na região do Núcleo Bandeirante.

No caso da região em estudo duas janelas de ocorrência da Formação Ribeirão Piçarrão são obervadas, sendo uma situada a oeste de maior dimensão, a qual foi confirmada durante a perfuração dos poços LX 11, LX 12, LX 13 e LX 14. Nestes casos os quartzitos e metassiltitos ocorrem imediatamente abaixo do perfil de solo. A perfuração do poço LX 3A permitiu verificar material siltoso e arenoso interpretado como vinculado ao topo da Formação Ribeirão Piçarrão. Neste caso a área de interpretação é menor, mas não se destaca a possibilidade de que se já maior. Esta interpretação também foi corroborada pelos resultados geofísicos que mostram uma zona de baixa resistividade na base das seções LX-7 e LX-25 que podem ser interpretados pela presença de zona de maior circulação de águas com maior condutividade elétrica.

A perfuração do Poço LX 6 foi interrompida a 52 metros de profundidade por ter interceptado uma camada de quartzito intensamente silicificada que foi atribuída à Formação Ribeirão Piçarrão não aflorante. Neste caso a estrutura é interpretada como uma anticlinal não exposta.

Com esta atualização do mapa geológico da região, também será necessário atualizar o mapa hidrogeológico. Neste sentido, a área de exposição da Formação Ribeirão Piçarrão são associadas ao Subsistema S/A do Sistema Paranoá e a área de ocorrência das ardósias da Formação Ribeirão do Torto são vinculadas ao Subsistema A do Sistema Paranoá. As vazões médias dos poços nestes subsistemas aquíferos são da ordem de 12 m^3/h no Subsistema S/A e de cerca de 4,0 m^3/h no Subsistema A (Campos, 2004).

O mapa geológico apresentado na Figura 38 foi confeccionado a partir de dados de subsuperfície obtidos durante a perfuração dos poços de monitoramento, uma vez que não existem exposições rochosas na área estudada.

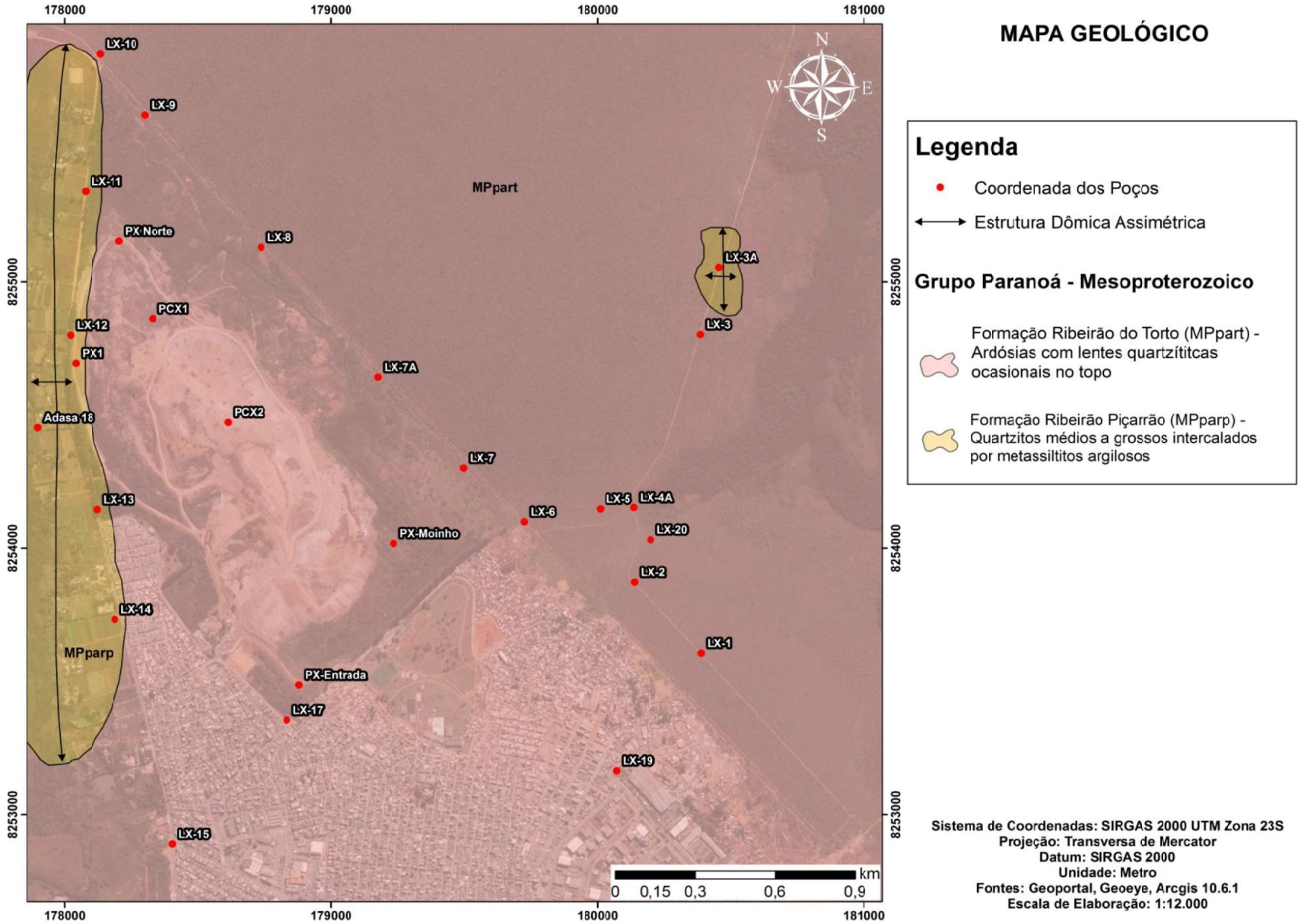


Figura 38 - Geologia da área de estudo, eliminada a as coberturas de solos.

9. CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

9.1 Caracterização Física dos Resíduos

A caracterização dos resíduos aterrados foi realizada a partir de análises gravimétricas *ex situ* e de análises qualitativas. As análises gravimétricas foram desenvolvidas a partir da adaptação da Norma Técnica Brasileira - ABNT/NBR 10007 (ABNT, 2004 - Amostragem de Resíduo Sólido), que geralmente é aplica a resíduos que são recentemente trazidos aos aterros. No caso em estudo tratam-se resíduos enterrados em intervalores de tempo variáveis de um até mais de 15 anos.

Os trabalhos de campo foram realizados entre os dias 03 e 12 de setembro de 2020 e incluíram as seguintes ações: visita prévia para determinação dos locais de amostragem, abertura de trincheiras com auxílio de retroescavadeira, separação manual dos materiais e disposição sobre lona plástica, pesagem em base úmida e em base seca (após pelo menos 3 dias de exposição do material), observação de taludes em áreas de resíduos expostos em aberturas de canaletas de drenagem ou em áreas de recém deposição e tamponamento das trincheiras.

Assim, para a avaliação das características dos resíduos do Lixão da Estrutural foram desenvolvidos 6 amostragens com abertura de trincheiras específicas para este fim (denominados GRA 01 a GRA 06), além de mais quatro pontos em que se utilizou taludes já abertos, para uma caracterização qualitativa dos resíduos (denominados GRQ 01 a GRQ 04). A localização e dimensões das trincheiras e taludes são apresentadas na Tabela 18. Após a conclusão das análises as trincheiras foram fechadas para se evitar acidentes. O material retirado ficou armazenado para possibilitar futuras observações.

Dos seis pontos de amostragem três estão situados na crista do maciço de lixo e representam materiais mais recentemente acumulados (Fase URE de operação do Lixão) e os outros estão situados nas bordas e são mais antigos, representando a operação tradicional do Lixão da Estrutural (com acumulação de entulhos e lixo doméstico) (Figura 39).

Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Elevação (m)	Dimensões (m)
GRA - 01	0821303	8254793	1149	3,60 x 2,40 x 2,00
GRA - 02	0821374	8254567	1156	4,00 x 2,10 x 1,70
GRA - 03	0178868	8254245	1153	3,60 x 2,40 x 2,10
GRA - 04	0179088	8254131	1136	3,90 x 2,40 x 2,30
GRA - 05	0821335	8254290	1145	3,60 x 2,40 x 2,40
GRA - 06	0178864	8253683	1131	3,30 x 2,10 x 2,00
GRQ - 01	0178907	8253643	1128	3,50 x 1,00
GRQ - 02	0821368	8254171	1137	2,00 x 2,00
GRQ - 03	0821252	8254544	1151	3,00 x 5,00
GRQ - 04	0821193	8254644	1155	3,00 x 4,00

Tabela 18 - Localização e dimensões dos pontos de amostragem. GRA representam trincheiras e GRQ representam taludes.

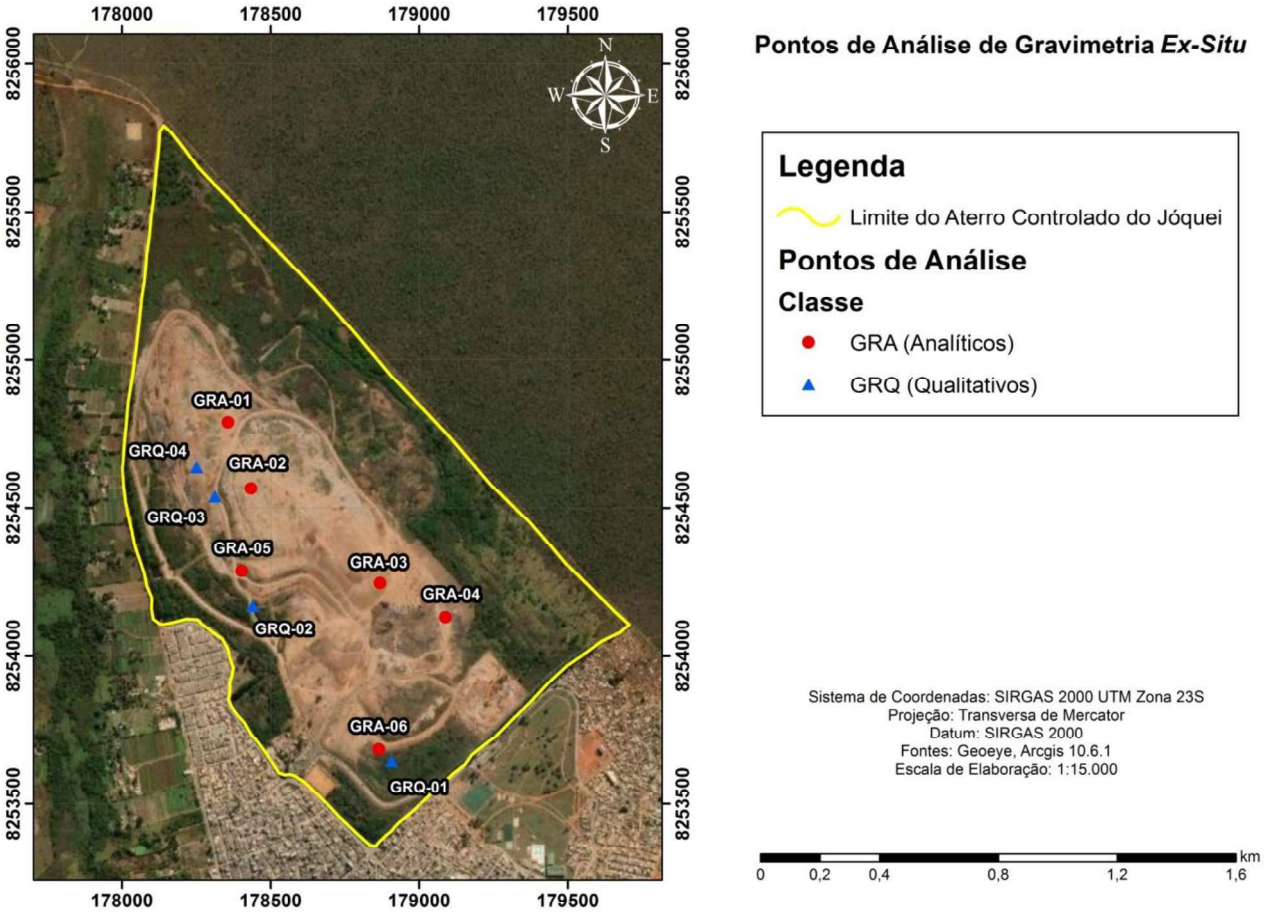


Figura 39 - Localização dos pontos de amostragem para análises gravimétricas (GRA) e de observação qualitativa em taludes existentes e em área de deposição atual de resíduos (GRQ).

Antes de se iniciar a separação dos materiais para medição da massa de cada classe foi realizada uma descrição geral com discriminação de tipos e porcentagens de cada tipo. A verificação da porcentagem foi feita de forma visual, considerando a observação durante a abertura da trincheira e a pilha formada com o material retirado.

O material retirado das pilhas de rejeitos já homogeneizadas foi depositado sobre lonas plásticas com auxílio de baldes plásticos de 30 litros de capacidade, sendo que a separação foi realizada de forma manual. Após a retirada de cada amostra são anotados os volumes e as massas. A pesagem foi feita com auxílio de balança digital com precisão de 10 g.

Para não gerar tendências artificiais ou vieses nas medidas, o material era organizado no interior dos baldes de forma a similar à observada no maciço do aterro, mantendo as mesmas distâncias entre os elementos. Esta ação visava a minimizar a compactação do material no interior do balde a superestimar as densidades obtidas após as operações com os dados de medidas de massa e de volumes. De qualquer modo é importante entender que se trata de análises com amostras homogeneizadas e perturbadas e não de amostras indeformadas e desta forma as densidades obtidas devem ser consideradas como de referência. Mesmo porque não há viabilidade para retirada de amostras indeformadas de maciços de rejeitos tão heterogêneos e com diferentes dimensões dos materiais acumulados.

As Figuras 40 a 42 ilustram o desenvolvimento dos trabalhos de campo desde a abertura das trincheiras, separação dos materiais, sucessivas pesagens além de materiais utilizados durante as operações em campo.

O Apêndice 4 traz o relatório específico das análises gravimétricas *ex situ*, onde é possível se verificar detalhes dos trabalhos de campo, bem como maior número de ilustrações dos materiais retirados das trincheiras.

Figura 40 - Abertura da trincheira GRA - 06 com a retirada e homogeneização dos resíduos. Detalhe para o tecido Geotêxtil retirado

Figura 41 - Baldes de 30 litros de capacidade utilizados nas operações de medição da massa dos rejeitos.

Figura 42 - Detalhe de operação de pesagem com auxílio de corda e balança digital.

Figura 43 - Exemplo de material já retirado e classificado segundo sua natureza (plástico, madeira, concreto e terra).

Durante os trabalhos foram identificados resíduos dos seguintes materiais:

- Terra: material que compõe a matriz dos rejeitos, com natureza variável (argilosa, arenosa, contaminada com outros resíduos), comumente apresenta-se rica em matéria orgânica decomposta, e apresenta tonalidade escura quando úmida com tendência de clareamento quando o material é secado ao sol (Figura 44);
- Madeira: pode ser representada por restos de obra (tábuas e tarugos) (Figura 45) ou por madeira de podas de árvores (com diferentes dimensões, desde gravetos até troncos mais grossos);

Figura 44 - Exemplo de terra obtida do interior da trincheira. Observar o aspecto heterogêneo e contaminado do material, que inclui pequenos fragmentos de vidro, madeira e rocha.

Figura 45 - Madeira retirada da escavação da amostra GRA - 04. Predominância de madeira utilizada em obras (tábuas e tarugos).

- Metais: compostos por ferro (vergalhões no interior de blocos de concreto), alumínio e latas, sempre apresentam aspecto fragmentário e são retorcidos (Figura 46);

- Tecido: apresenta natureza muito diversa podendo ser de algodão, sintético ou ainda tecido geotêxtil (tipo bidin, Figura 47);

- Entulhos de obras: são restos de construções em que se destacam blocos de concreto, fragmentos de azulejos e outros revestimentos, pedras de revestimento (Figura 48);

Figura 46 - Exemplos de material metálico obtido da amostra GRA - 02. Presença comum de vergalhões, além de latas e outros fragmentos.

Figura 47 - Material classificado como tecido (amostra GRA - 02). Na média esta classe de resíduos inclui pano de algodão, tecidos sintéticos e bidin.

Figura 48 - Entulho de obra (também classificado como concreto ou escombro), composto por blocos de concreto, revestimentos de piso e paredes e fragmentos de rocha de cantaria.

- Vidro: representado por garrafas (inteiras ou quebradas, Figura 49) e outros fragmentos do tipo vidro laminado;

- Plástico: representados por sacos (utilizados para acomodação do resíduo orgânico), fragmentos de artefatos de natureza variada (brinquedos infantis, peças de veículos, materiais de construção, e outros). Apresentam cores variadas e diferentes graus de preservação decomposição (Figura 50);

- Papel/papelão: apenas observado em resíduos mais jovens é representado por embalagens, livros, cadernos e outros (Figura 51).

Figura 49 - Resíduos classificados como vidro, que é representado por garrafas inteiras ou fragmentos de vidros de diferentes cores.

Figura 50 - Exemplo de plástico obtido da amostragem no ponto GRA – 02. Observar a diversividade de origem dos materiais.

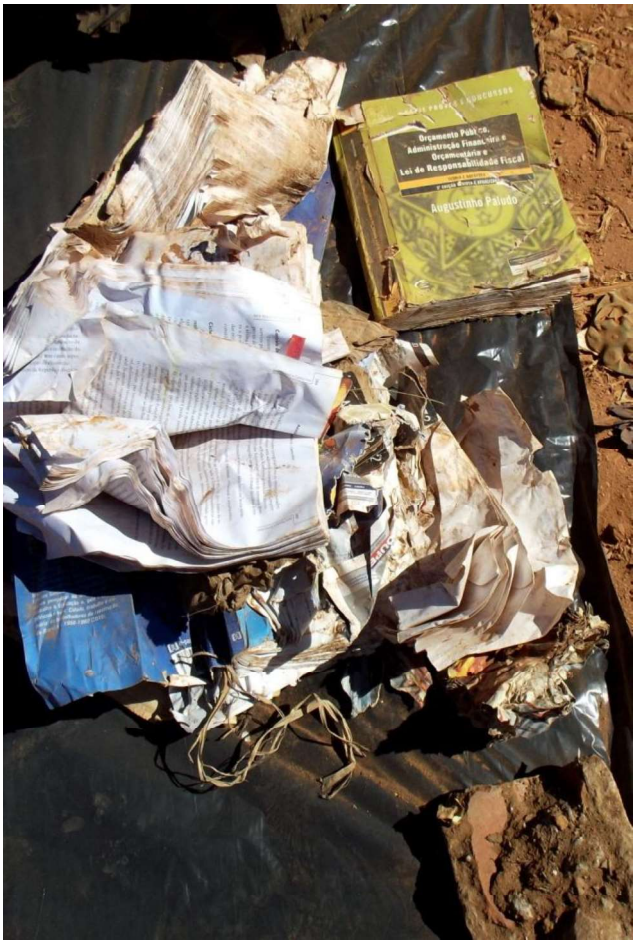


Figura 51 - Exemplo de papel obtido da escavação da amostra GRA - 02. Este tipo de material não é comum, sendo apenas encontrado em aterro recente. Nas amostras de resíduos antigos esta classe de material já foi totalmente decomposta em conjunto com a porção orgânica.

Um aspecto marcante é a ausência de matéria orgânica, que compõe grande parte dos resíduos de origem doméstica. Este fato é determinado pela rápida decomposição desta fração dos resíduos que se transforma em uma massa de cor preta e forte odor de putrefação. Em alguns casos é possível observar este material com elevada umidade dentro dos sacos plásticos utilizados para transporte destes resíduos até o lixão.

Ainda com relação às feições físicas dos resíduos a observação de campo mostra que o odor fétido é marcante no momento de abertura das trincheiras. Após alguns dias de exposição, tanto o material retirado, quanto a trincheira aberta apresentam diminuição do cheiro.

A heterogeneidade dos resíduos é facilmente caracterizada pela observação das trincheiras e taludes, sendo que a composição dos resíduos não se repete em nenhum local de análise, bem como suas proporções. O lixo mais antigo apresenta maior conteúdo madeira e matéria orgânica decomposta, enquanto nos resíduos mais jovens predominam resíduos inertes, como terra e restos de obras. Esta observação inclusive pode ser aplicada para os resíduos mais recentemente acumulados, que mudam lateralmente para cada caminhão ou caçamba que é depositada (Figura 52).

Figura 52 - Resíduo depositado entre os dias 08 e 10 de setembro de 2020. No extremo esquerdo da imagem predominam materiais plásticos, na porção central há predominância de escombros de obras e na parte esquerda ocorre exclusivamente material vegetal de podas de árvores. Pilha com média de 2 metros de elevação.

A descrição geral de cada trincheira indica as seguintes condições:

- GRA – 01: ampla predominância de blocos de concreto, com ocorrência de madeira e muito solo na matriz, além de plástico e metais de forma subordinada (um pneu também foi recuperado);
- GRA – 02: resíduos diversificados com restrita contribuição orgânica, sendo a maior parte lixo seco com contribuição de madeira, papel, plástico, pouco vidro, tecido, blocos de concreto e muito solo na matriz;
- GRA – 03: ampla predominância de madeira de poda de árvores (inclusive folhas e gravetos), com restos de obras (concreto, azulejo, fragmentos de mármore) e terra na mariz, além de pouco plástico, vidro e metais.
- GRA – 04: lixo bastante diversificado com predominância de terra na matriz, com madeira, combros de obras, vidro, plático e metal;
- GRA – 05: resíduo com predominância de terra, plástico e ainda lixo orgânico em decomposição com forte odor de matéria orgânica em decomposição. Ainda se observam fragmentos de madeira, restos de obra (blocos de concreto), ferro (observado como vergalhões em blocos de concreto maiores) e
- GRA – 06: lixo antigo bastante diversificado, com muito plástico, matéria orgânica já decomposta e menores proporções de escombros de obras, e terra muito contaminada compondo a Mariz. Neste ponto se destaca um grande rolo de tecido geotêxtil do tipo bidin (representado por vários meros deste material).

As Tabelas 19 a 24 trazem os resultados das medidas de volumes e massas em cada ponto de observação bem como as densidades em base úmida e seca. A medição do material para determinação da base seca foi realizada após, pelo menos, dois dias de secagem natural das pilhas preservadas sobre lona plástica.

GRA-01	Madeira	Plástico	Concreto	Terra	Pneu	Total ou Média
Porcentagem	12%	3%	50%	35%	-	T = 100%
Volume (m³)	0,095	0,03	0,094	0,06	0,03	T = 0,309
Peso em base úmida (kg)	37,450	3,145	121,100	67,82	9,140	T = 238,655
Densidade em base úmida (g/cm³)	0,3942	0,1048	1,2882	1,1303	0,3046	M = 0,7723
Densidade em base seca (g/cm³)	0,3275	0,1048	1,2882	0,9556	0,3046	M = 0,5961

Tabela 19 - Material recuperado no ponto de amostragem GRA - 01 e respectivas medidas de volume e massa e densidades (média simples) em base úmida e seca.

GRA-02	Madeira	Plástico	Concreto	Terra	Tecido	Papel	Total ou Média
Porcentagem	10%	7%	25%	50%	4%	4%	T = 100%
Volume (m³)	0,065	0,05	0,08	0,06	0,04	0,03	T = 0,315
Peso em base úmida (kg)	21,860	3,490	92,370	76,480	6,460	4,305	T = 204,965
Densidade em base úmida (g/cm³)	0,3363	0,0698	1,1546	1,2756	0,16	0,1435	M = 0,6506
Densidade em base seca (g/cm³)	0,3128	0,0698	1,1546	1,1864	0,1488	0,1334	M = 0,500

Tabela 20 - Material discriminado no ponto de amostragem GRA - 02 e respectivas medidas de volume, massa e densidades médias em base úmida e seca.

GRA-03	Madeira	Plástico + Papel	Concreto	Terra	Folha	Metais	Vidro	Tecido	Total ou Média
Porcentagem	35%	5%	20%	30%	6%	1,5%	-	2,5%	T = 100%
Volume (m³)	0,12	0,03	0,06	0,04	0,045	0,015	0,01	0,052	T = 0,401
Peso em base úmida (kg)	47,770	3,345	76,630	44,830	6,320	7,490	0,175	8,155	T = 194,715
Densidade em base úmida (g/cm³)	0,3980	0,1115	1,2771	1,1207	0,4213	0,4993	0,0175	0,1568	M = 0,4842
Densidade em base seca (g/cm³)	0,3699	0,1115	1,2771	1,0416	0,080	0,4993	0,0175	0,147	M = 0,4429

Tabela 21 - Material obtido do ponto de amostragem GRA - 03 e respectivas medidas de volume e massa e densidades (médias) em base úmida e seca.

GRA-04	Madeira	Plástico	Concreto	Terra	Tecido	Vidro	Total ou Média
Porcentagem	15%	4%	25%	50%	4%	2%	T = 100%
Volume (m³)	0,14	0,05	0,075	0,06	0,05	0,008	T = 0,383
Peso em base úmida (kg)	43,220	4,500	103,050	70,310	7,355	5,740	T = 234,17
Densidade em base úmida (g/cm³)	0,3087	0,09	1,3740	1,1718	0,1471	0,7175	M = 0,6348
Densidade em base seca (g/cm³)	0,2613	0,09	1,3740	1,1386	0,0943	0,7175	M = 0,6126

Tabela 22 - Material resgatado no ponto de amostragem GRA - 04 e respectivas medidas de volume, massa e densidades em base úmida e seca.

GRA-05	Madeira	Plástico	Concreto	Terra	Total ou Média
Porcentagem	22%	10%	18%	50%	T = 100%
Volume (m³)	0,075	0,06	0,064	0,09	T = 0,289
Peso em base úmida (kg)	25,970	9,440	82,770	125,150	T = 243,33
Densidade em base úmida (g/cm³)	0,3462	0,1573	1,2932	1,3905	M = 0,8419
Densidade em base seca (g/cm³)	0,2568	0,1573	1,2932	1,1836	M = 0,7227

Tabela 23 - Material obtido no ponto de amostragem GRA - 05 e respectivas medidas de volume, massa e densidades em base úmida e seca.

GRA-06	Madeira	Plástico	Concreto	Terra	Tecido	Total ou Média
Porcentagem	10%	7,5%	10%	60%	12,5%	T = 100%
Volume (m³)	0,05	0,12	0,075	0,03	0,12	T = 0,395
Peso em base úmida (kg)	20,170	12,220	93,410	38,810	11,210	T = 175,82
Densidade em base úmida (g/cm³)	0,4034	0,1018	1,2454	1,2936	0,0934	M = 0,6275
Densidade em base seca (g/cm³)	0,3189	0,1018	1,2454	1,1313	0,08	M = 0,5748

Tabela 24 - Material acumulado no ponto de amostragem GRA - 06 e respectivas medidas de volume e massa e densidades em base úmida e seca.

Os valores obtidos das análises gravimétricas mostram que há diminuição da densidade dos materiais considerando sua base úmida e seca, sendo que tal comportamento já era esperado uma vez que com a perda da água os materiais se tornam mais leves.

Materiais que absorvem pouca ou nenhuma água não tiveram sua medição de massa replicada após a secagem, pois se verificou que a diminuição era mínima ou imperceptível com a balança digital utilizada (além do erro da medida ainda existem as incertezas na determinação dos volumes).

A Tabela 25 mostra os percentuais médios e as densidades médias das seis amostras estudadas.

Materiais	% Médio	Densidade Média
Madeira	17,333	0,3644
Plástico	4,416	0,1058
Concreto	24,666	1,2720
Terra	45,833	1,2302
Tecido	5,75	0,1393
Metais + Vidro + Papel + Pneus	2,0	1,1084

Tabela 25 - Médias dos percentuais e das densidades dos materiais para os seis pontos de amostragem.

Terra e concreto são os materiais mais abundantes na massa aterrada, correspondendo a pouco mais de 70% do volume acumulado. Em seguida se destacam resíduos de madeira com 17% da massa de rejeitos. Tecido e plástico completam os volumes com conteúdo significativo, respectivamente com 5,75% e 4,42%. Outros materiais identificados correspondem a 2% da massa do aterro sendo representados por metais, vidro, papel e pneus.

A análise global resulta em uma densidade média ponderada pelos volumes de **0,9756 g/cm^3**. A densidade global a seco próxima a 1 g/cm^3 é devida à grande porosidade resultante no interior do maciço. Mesmo considerando a grande quantidade blocos de concreto e terra presente na massa de resíduos os vazios no interior são responsáveis pela redução da densidade média.

9.2 Quantificação dos Resíduos Acumulados

A estimativa do conteúdo de materiais acumulados no aterro foi feita a partir de um método direto isto é, o volume foi obtido pelo produto da área vezes a altura da pilha de rejeitos e a massa, pelo produto do volume pela densidade média ponderada (pelos volumes individuais obtidos das análises gravimétricas *ex situ*).

Como o maciço de rejeitos não é representado por uma figura geométrica regular, mas apresenta diferentes elevações com patamares e bermas (ou rampas) e, se optou por seccionar o maciço em fatias com 6,75 metros de elevação, sendo o que o volume total corresponde à soma das diferentes fatias empilhadas.

Como não existe um levantamento topográfico recente e confiável, optou-se pela confecção de um modelo digital de elevação a partir de pontos cotados com GPS dotado de barômetro, que permite uma precisão de 50 cm (desde que sua recepção ocorra simultaneamente com o maior número possível de satélites). Assim, foram utilizados 59 pontos com coordenadas

UTM e cotas. Estes dados foram cotejados com os pontos cotados obtidos de mapas com grande escala para se ter a maior confiabilidade nos resultados do modelo de elevação resultante.

É importante salientar que como a URE está plenamente ativa, os levantamentos altimétricos, mesmo com auxílio de drones são rapidamente ultrapassados, pois os volumes diariamente acumulados modificam as superfícies de forma muito rápida. Outro aspecto relevante é a determinação da superfície de base, pois não há informações sobre a época do início da acumulação dos rejeitos da área: se estes foram acumulados diretamente na superfície natural do terreno ou se foram abertas trincheiras e qual a profundidade destas trincheiras.

De qualquer modo praticamente toda a área do antigo Lixão da Estrutural (mesmo em parte da "área embargada") apresenta registro de acumulação de algum tipo de aterro. Assim, a área de acumulação considerada foi: limitada ao sul pela cidade Estrutural, limitada a leste / sudeste pela rodovia de acesso à ocupação denominada de "26 de Setembro" e limitada à oeste pela área embargada (300 metros a leste da cerca limítrofe do Parque Nacional de Brasília).

A Figura 53 mostra o modelo digital de elevação a partir dos pontos de controle de campo e dos dados topográficos disponíveis e a Tabela 26 traz os dados dos pontos de controle obtidos em campo com GPS barométrico.

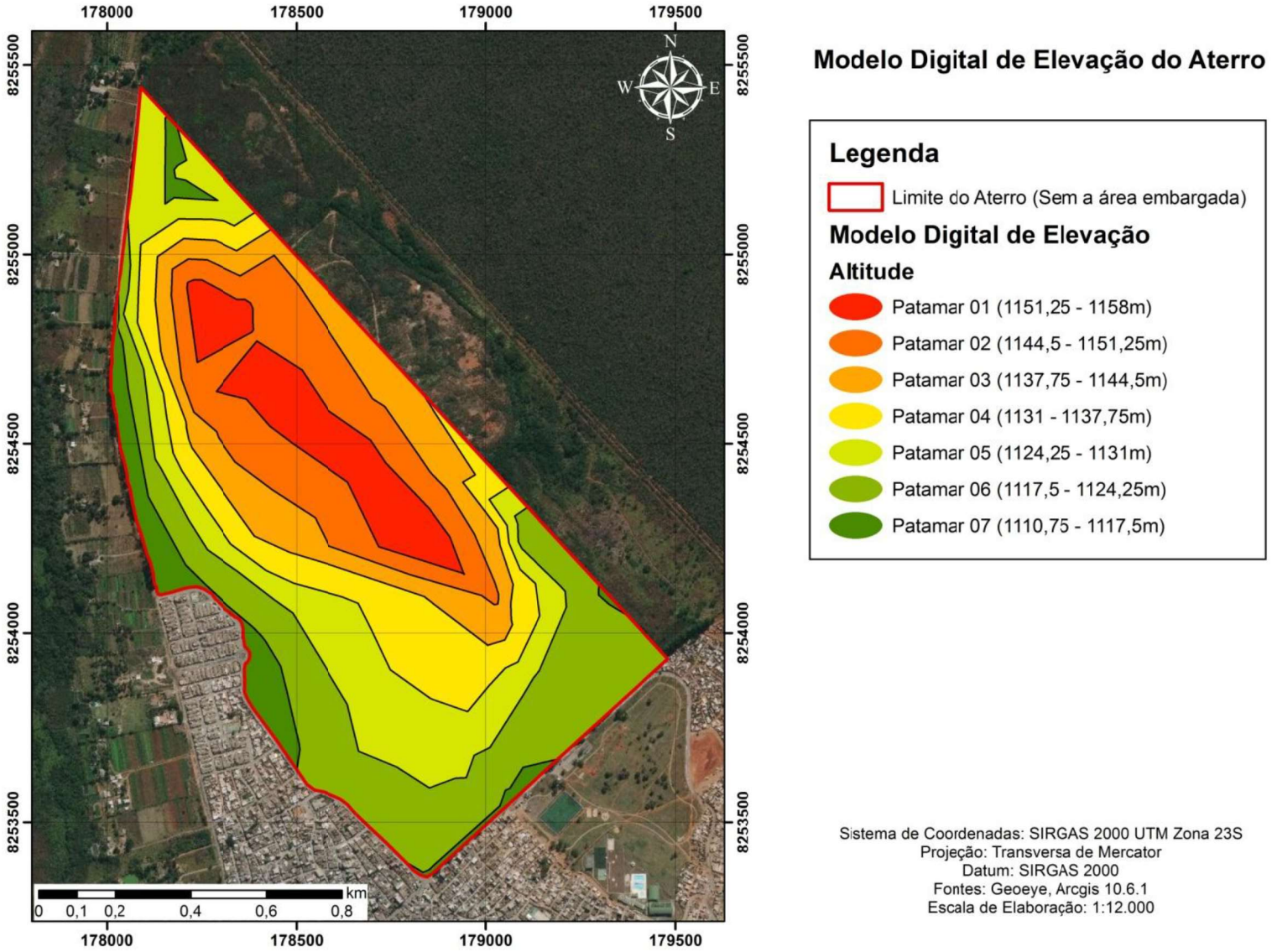


Figura 53 - Modelo Digital de Elevação - MDE do antigo Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural.

Ponto	Coordenada X	Coordenada Y	Elevação
PC-01	179088	8254137	1135
PC-02	179069	8254151	1137
PC-03	179030	8254276	1138
PC-04	179032	8254230	1139
PC-05	178909	8254418	1141
PC-06	178744	8254635	1142
PC-07	821456	8254839	1147
PC-08	821456	8255094	1139
PC-09	821045	8255039	1131
PC-10	820994	8254860	1125
PC-11	821038	8254449	1120
PC-12	821076	8254462	1125
PC-13	821154	8254498	1137
PC-14	821165	8254221	1121
PC-15	821410	8254054	1124
PC-16	821320	8254264	1138
PC-17	821260	8254531	1147
PC-18	821157	8254555	1139
PC-19	821182	8254628	1150
PC-20	821409	8254230	1139
PC-21	178767	8254098	1135
PC-22	178731	8253762	1128
PC-23	178863	8253683	1127
PC-24	178974	8253533	1121
PC-25	178911	8253738	1129
PC-26	178949	8253793	1131
PC-27	178997	8253923	1135
PC-28	179054	8253940	1135
PC-29	821343	8254785	1151
PC-30	821310	8254873	1152
PC-31	821181	8254921	1154
PC-32	821338	8254681	1154
PC-33	821458	8254567	1155
PC-34	178684	8254449	1155
PC-35	178846	8254233	1158
PC-36	179025	8254098	1146
PC-37	179046	8254014	1140
PC-38	179137	8253890	1124
PC-39	179280	8254095	1118
PC-40	179094	8254243	1122
PC-41	179094	8254291	1122
PC-42	179440	8253891	1122
PC-43	179082	8253551	1115
PC-44	178830	8253350	1117
PC-45	178569	8253585	1119
PC-46	821131	8255177	1122
PC-47	821143	8255223	1125
PC-48	821124	8255250	1123
PC-49	821152	8255280	1123
PC-50	821194	8255226	1126
PC-51	821290	8253967	1114
PC-52	821063	8254112	1109
PC-53	820970	8254810	1115
PC-54	821042	8255856	1125
PC-55	821104	8255633	1127
PC-56	821288	8255140	1125
PC-57	178761	8255140	1125
PC-58	179425	8254418	1115
PC-59	179724	8254105	1104

Tabela 26 - Localização por coordenadas UTM e altitude de pontos de controle para a determinação do Modelo Digital de Elevação da área da Unidade de Recebimento de Entulhos URE da Estrutural.

O cálculo de volume total do aterro foi realizado com auxílio do *Software Arcgis 10.6.1*, onde os 59 pontos cotados por GPS barométrico foram espacializados e interpolados por meio da ferramenta *TIN* (Triangular Irregular Network) gerando o MDE (Modelo Digital de Elevação). A partir desse modelo, o aterro foi seccionado em patamares topográficos, semelhantes a fatias topográficas, e cada patamar teve seu volume medido (Volume = Área x Altura). Com os dados de volume e densidade média dos resíduos foi possível estimar com aproximação a quantidade atual em toneladas de material acumulado no aterro. Importante ressaltar que para essa estimativa as rampas dos taludes não foram levadas em consideração, tendo em vista que as diferenças de altitude obtidas entre os patamares pelo modelo representam a variação em uma superfície totalmente vertical.

Para a caracterização adequada do volume total dos resíduos foram desconsiderados tanto o Patamar 07, que representa a topografia natural do terreno antes do início do aterro como também uma porção nordeste da área. Essa área, que fica a cerca de 300 metros do limite do Parque Nacional de Brasília foi embargada e teve o material acumulado retirado.

A partir dos dados produzidos pode-se afirmar que a maior elevação da pilha de resíduos é de 40,5 metros, o que é corroborado por outros dados disponíveis, de poços estratigráficos e de estudos geofísicos (Tabela 27). Contudo a área ocupada por esta elevação máxima é restrita apenas à crista do maciço de resíduos, sendo que a elevação média é de cerca de 20 metros.

Patamar	Área (m²)	Altura (m)	Volume (m³)
01	128.911,50	6,75	799.251,30
02	353.243,00	6,75	2.384.390,25
03	465.866,00	6,75	3.144.595,50
04	733.765,00	6,75	4.952.913,75
05	992.947,00	6,75	6.702.392,25
06	1.321.640,00	6,75	8.921.070,00
Total			**26.904.613,05**

Tabela 27 - Volume ocupado por cada patamar derivado do MDE.

O volume da pilha de rejeito obtido pelo método adotado foi de **26.904.613,05 m^3**, o que resulta em uma massa de resíduos *in situ* de **26.248.140 toneladas**, considerando a densidade média de **0,9756 g/cm^3** (obtida das análises gravimétricas) (Tabela 28).

Volume - Patamares 1 a 6 (m³)	Densidade (g/cm³)	Total (Toneladas)
26.904.613,05	0,9756	26.248.140,49

Tabela 28 - Síntese dos resultados de volume e massa de resíduos contidos no Lixão da Estrutural.

10. EXPERIÊNCIAS DE PRÁTICAS PARA REMEDIAÇÃO DE LIXÕES

Este item tem como objetivo apresentar tecnologias aplicadas à remediação ou mitigação de impactos gerados por deposição inadequada de resíduos sólidos urbanos, classificados nas categorias de lixões ou aterros controlados.

A lista de técnicas a seguir enumerada e brevemente discutida é considerada a partir da literatura e sua aplicação é contextualizada ao caso específico do Lixão da Estrutural.

Os estudos e análises de passivos ambientais devem seguir à seguinte metodologia:

- Avaliação Preliminar
- Investigação confirmatória
- Investigação detalhada
- Avaliação de risco
- Ações de remediação

O caso do Lixão da Estrutural pode ser considerado um caso atípico de um passivo/ativo ambiental com histórico de décadas, sem bom registro da operação (que foi modificada ao longo do tempo) e que atualmente se encontra encravado entre uma unidade de conservação ambiental (o Parque Nacional de Brasília), uma área urbana consolidada (a cidade Estrutural) e uma área de produção agrícola (pequenas propriedades de plantação de hortaliças).

Neste caso, pode-se considerar que a Avaliação Preliminar e a Investigação Confirmatória já estejam contempladas pelos diferentes estudos acadêmicos e de outras naturezas realizados na área (consultorias técnicas, avaliações em campo, análises econômicas, etc.). Estes estudos foram realizados desde o período de antecedeu a decisão de mudança da área de destinação dos resíduos sólidos do Distrito Federal no ano de 2018, além de considerar que os principais impactos ao meio físico gerados pelo Lixão da Estrutural são: contaminação das águas subterrâneas e poluição atmosférica. Além destes dois complexos impactos relativos ao meio físico, também existem impactos relativos aos meios biótico e socioeconômicos, os quais não estão contemplados na presente análise.

A investigação detalhada está em fase de realização (presente Projeto e Projeto CEB/Eletronorte/Finatec). Ainda resta concluir esta etapa, com a conclusão dos projetos citados e complementação de aspetos específicos pendentes (por exemplo, vazão dos gases de efeito estufa produzidos).

A Avaliação de Risco e a Remediação devem ser iniciadas por etapas, em função da disponibilidade de informações técnicas e de recursos financeiros.

Dentre as principais técnicas desenvolvidas para remediação de áreas contaminadas por diferentes fontes (aterros industriais, aterros de resíduos domésticos, hidrocarbonetos, cemitérios, e outras), destacam-se:

- Extração multifásica (*Multi-Phase-Extraction* - MPE)
- Extração de fases mistas (*Dual-Phase-Extraction* - DPE)
- Extração de vapores dos solos (*Soil Vapor Extraction* -SVE)

- Injeção de ar (*Air Sparging* - SPG)
- Bombeamento e tratamento (*Pump and Treat*)
- Instalação de Barreira Hidráulica
- Instalação de Barreira Reativa
- Oxidação Química *In Situ* (ISCO)
- Redução Química *In Situ* (ISCR)
- Biorremediação
- Enclausuramento da fonte
- Atenuação Natural

As técnicas descritas como Multi-Phase-Extraction (MPE), Dual-Phase-Extraction (DPE), Soil Vapor Extraction (SVE), Air Sparging (SPG), Barreira Reativa, Oxidação Química in situ (ISCO) e Redução Química *in situ* (ISCR) são mais específicas e aplicadas para área contaminadas por hidrocarbonetos, resíduos industriais organoclorados e organofosfatados, dentre outros.

As informações até o momento disponíveis mostram que os principais problemas ambientais associados ao Lixão da Estrutural são: contaminação dos recursos hídricos subterrâneos e produção de gases de efeito estufa, além de outros poluentes atmosféricos (principalmente gases de combustão e particulados totais). As análises dos solos mostraram que a esperada contaminação deste meio por metais é bastante reduzida e não deve ser considerada como um problema prioritário para as ações de mitigação e recuperação.

Especificamente para o caso do Lixão da Estrutural as seguintes devem ser priorizadas:

Bombeamento e Tratamento

Técnica específica para a contenção da pluma de contaminação, com a instalação de poços tubulares para bombeamento do chorume diluído em diferentes posições da migração do efluente.

O efluente deverá ser tratado em uma estação dedicada com aplicação de técnicas mistas ou isolada com observação do custo do tratamento, que deve ser o mais baixo possível para viabilizar sua implantação. O tratamento deve ser no mínimo adequado para o lançamento do efluente tratado em cursos d'água naturais (que no caso do Lixão são cabeceiras de afluentes do Lago Paranoá).

A osmose reversa é uma técnica de tratamento que é utilizado de forma comum para atenuar os impactos do chorume ao meio ambiente. Esta técnica é em geral utilizada no chorume bruto acumulado em reservatórios, entretanto, pode e deve ser testado para tratar efluentes obtidos de poços nas zonas marginais das plumas de contaminação. Uma questão que restringe o uso da osmose reversa para o tratamento de efluentes de lixões é seu custo relativamente elevado.

Tratamentos convencionais com base em técnicas biológicas ou quimicamente assistida são eficazes, contudo, seu custo em alguns casos é proibitivo. Além dos elevados custos, a aplicação do tratamento biológico pode apresentar outras limitações, pois o desenvolvimento ação das bactérias pode ser limitada em função das características variáveis do chorume (que pode apresentar rápidas mudanças de pH, estado de óxido-redução, concentrações e Demanda Química de Oxigênio).

Além do tratamento pode-se considerar a reinjeção do efluente acumulado em reservatórios no próprio maciço de resíduos para que ocorram processos de degradação em seu interior. A reinjeção é uma técnica tradicional que é considerada efetiva, uma vez que com a recirculação ocorrem reações de óxido-redução capazes de minimizar a toxidez das substâncias e por consequência do efluente, além de evitar o espalhamento do efluente para outras áreas no ambiente não afetado.

A reinjeção para o caso em estudo é bastante significativa, pois a zona não saturada no maciço de lixo varia entre 21 a 10 metros, o que significa um amplo espaço para acumulação do efluente em um "aquífero artificial" com porosidade muito elevada (da ordem de 45 a 50%)

Os poços de bombeamento devem ser instalados nos locais em que as plumas de contaminação se encontram mais avançadas e com as maiores concentrações, o que já foi definido com os resultados do diagnóstico do presente projeto.

Barreira Hidráulica

As barreiras podem ser instaladas de diferentes formas, incluindo barreiras impermeáveis, barreiras permeáveis com tratamento *in situ* ou pela instalação de cones de depressão para contenção da migração da pluma (barreira de contenção).

O mais adequado para o caso do Lixão da Estrutural é que essa técnica seja associada à anterior (bombeamento e tratamento), a partir da instalação de bateria de poços para contenção da migração natural da pluma em direção às cabeceiras dos córregos do Acampamento, Cabeceira do Valo e Ribeirão Bananal.

Na continuidade do desenvolvimento do presente projeto algumas técnicas de tratamento não convencionais serão testadas sempre com foco no custo por metro cúbico de efluente tratado e na efetividade com relação à composição do efluente em diferentes posições na pluma. Assim, serão testados os tratamentos por *wetlands* construídas e filtros de zeólita, uma vez que a amônia é a principal substância contaminante. A simples oxidação não garante depuração adequada, pois a amônia deve formar nitrato que é um efluente causador da antropização de corpos de água lênticos (como é o caso do Lago Paranoá).

Biorremediação

Essa técnica inclui todas as ações de organismos para a atenuação de cargas contaminantes e plumas de contaminação e outras formas de degradação ambiental. Neste sentido considera-se que a fitorremediação e as *wetlands* construídas, além da simples recuperação da vegetação em áreas específicas já sejam suficiente para o caso do Lixão da Estrutural.

Para a construção de *wetlands* serão aproveitadas as experiências aplicadas a efluentes domésticos, uma vez que não existem exemplos de tratamento de efluentes derivados da decomposição de resíduos sólidos. Em princípio serão testadas espécies vegetais já empregadas neste tipo de técnica, incluindo uma população mista de macrófitas flutuantes, submersas e emergentes.

Outra vertente de aplicação da biorremediação é na forma de reflorestamento por espécies arbóreas de maior porte, principalmente para absorver a poluição atmosférica em direção ao Parque Nacional de Brasília. Neste aspecto é fundamental entender que a área limítrofe com um Parque Nacional denominada de "área embargada" (300 metros a oeste / noroeste do limite com o Parque Nacional de Brasília) deve ter a função de absorver parte do problema causado pelo lixão. Neste sentido, considera-se de fundamental importância que esta faixa seja revegetada com espécies arbóreas nativas do bioma cerrado. Esta faixa já foi local de acumulação de resíduos e que por força de processos legais teve seu uso interrompido para este fim. Entretanto, a retirada dos resíduos e a conformação geomorfológica não foram adequadas e a vegetação secundária indicadora da presença de resíduos (leucena, margaridão, mamona e outras) invadiu toda a área.

A revegetação desta faixa deverá ser fundamental para se evitar a invasão da área do parque, principalmente por gramíneas exóticas (como atualmente observado).

Enclausuramento da Fonte

Corresponde ao isolamento da fonte geradora dos impactos e é utilizada como prática de atenuação de impactos ambientais em diferentes projetos de gerenciamento de áreas degradadas. Por exemplo, em uma planta produtora de agregados (brita, areia artificial), em uma usina de asfalto ou em um moinho de rochas para uso na agricultura (pó de dolomito), os equipamentos geram amplos volumes de particulados atmosféricos. A mitigação deste tipo de impacto pode ser alcançada pelo enclausuramento da fonte produtora por um galpão e com o bombeamento para sistemas de filtros úmidos que apreendem os sólidos.

No caso do Lixão esta técnica deve considerar o isolamento do maciço de resíduos pela compactação e impermeabilização de sua superfície de forma a evitar a infiltração das águas de chuvas diretamente no maciço. A água drenada deve ser direcionada por tubulações ou canaletas

abertas para que seja infiltrada nas áreas marginais fora da zona de aterro. Esta água deverá ampliar os efeitos da atenuação natural pela diluição das cargas já contidas no aquífero.

A experiência atual na operação do lixão confirma a importância desta técnica. No período chuvoso com destaque para os meses de dezembro a abril há produção ampla de chorume que é acumulado nos dois reservatórios atualmente em operação. O grande volume produzido é bombeado para caminhões-tanque e reinjetado na porção elevada do maciço de resíduos. Quando se adentra no período seco do ano a produção de chorume que se acumula nos reservatórios é minimizada e no final da seca a produção é naturalmente interrompida.

Mitigação dos Impactos dos Gases

Os gases produzidos pela decomposição dos resíduos orgânicos em depósitos de resíduos urbanos são majoritariamente compostos por Dióxido de Carbono (CO_2) e Metano (CH_4) o qual é combustivo. Estes resíduos gasosos podem seguir três caminhos: ser liberados diretamente pelos sistemas de drenos verticais, ter sua fração combustiva queimada ou ser aproveitados para geração de energia termoelétrica.

A opção mais adequada do ponto de vista ambiental seria sua canalização e uso em usinas de geração de energia, entretanto, essa opção exige elevado investimento e apresenta riscos relativos às incertezas nas proporções de gases produzidas (relações CH_4 / CO_2), nas vazões geradas e no poder de produção de calor das misturas. Por isso, a opção de continuidade da queima dos gases é considerada a opção mais adequada para o Lixão da Estrutural, uma vez que o metano após sua combustão se transforma em CO_2 e vapor de água segundo a seguinte reação: $CH_4 + O_2 \rightarrow ½\ CO_2 + 2H_2O$, sendo que o gás carbônico traz impactos ambientais à atmosfera menos significativos que o metano.

Atenuação Natural

Corresponde à mitigação dos contaminantes pela própria ação da natureza e neste caso os processos devem ser avaliados e monitorados periodicamente ao longo de períodos longos.

Como exemplo cita-se a diluição natural da pluma de contaminação de chorume quando se distancia progressivamente da sua área de geração (maciço de resíduos). Com a infiltração das águas de chuvas há sua mistura com a fase contaminante resultando na diminuição da concentração o que pode ser configurado como um tratamento *in situ* ou atenuação pela própria ação da natureza. Este processo ocorre na área, em especial em direção a leste, pois a recarga natural na área do Parna Brasília é eficiente. Em direção ao Córrego Cabeceira do Valo este processo é significativamente diminuído em função da ampla impermeabilização da área urbana da cidade Estrutural.

Outro exemplo de atenuação natural seria a adsorção de metais na estrutura cristalina de minerais dos solos ou na porosidade interna de fases amorfas, ou ainda a volatilização de amônia quando exposta à atmosfera.

Outros processos de atenuação natural devem ser considerados, estudados e monitorados na área do Lixão da Estrutural.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi avaliado o diagnóstico ambiental da área do lixão e adjacências, incluindo parcela no Parque Nacional de Brasília e poligonal urbana da Cidade Estrutural. Alguns resultados encontrados indicam valores menores que os esperados, pois quando se observa a área em que os resíduos foram aterrados e que ainda recebe entulhos, restos vegetais de podas de árvores e outros resíduos seriam esperados impactos ambientais globais mais significativos. Os principais atenuadores dos problemas ambientais gerados pelo antigo lixão da Estrutural são devidos aos tipos de resíduos acumulados e à resiliência da natureza.

Para a determinação dos limites da contaminação das águas subterrâneas e das concentrações do contaminante foram integrados os resultados dos estudos geofísicos e hidroquímicos. Os dados hidroquímicos corroboram integralmente as informações geradas pelo método geofísico de tomografia elétrica (eletrorresistividade), sendo que os valores de resistividade elétrica inferiores a 1000 Ω/m representam algum tipo de contaminação em subsuperfície.

A instalação de 22 poços de monitoramento e utilização de poços existentes permitiu verificar a heterogeneidade da pluma de contaminação que apresenta condutividade elétrica maior que 10.000 µS/cm na área principal do maciço e reduz progressivamente quando se afasta da região com a maior espessura de resíduos, alcançando valores da ordem de 50 µS/cm nas zonas externas da pluma de contaminação.

Com relação à contaminação dos aquíferos freáticos o antigo lixão é responsável por afetar uma área de cerca de 600 hectares. Entretanto, a contaminação é apenas crítica sob o maciço de lixo e em suas adjacências, sofrendo rápida diluição a partir da infiltração das águas de recarga natural. A contaminação é maior em direção a oeste e sudoeste, uma vez que para este quadrante o gradiente é maior e a condutividade hidráulica do meio é da ordem de 10^{-6} m/s em função da presença do aquífero do Subsistema S/A do Sistema Paranoá. Com relação aos quadrantes norte e sudeste adentrando a poligonal do Parque Nacional de Brasília a contaminação sofre forte atenuação em função dos seguintes fatores: i) menor gradiente natural que minimiza a velocidade de migração da pluma; ii) excelentes condições de recarga natural que permite anualmente entrada de grande volume de águas de chuvas com excelente qualidade e iii) presença de ardósias e solos com textura muito argilosa (latossolos e gleissolos). Em

direção ao sul, para o interior da área urbana a contaminação é minimizada, pois naquela região nunca foi disposto grandes volumes de resíduos, tendo sido operado um sistema com células rasas em que os resíduos eram compactados e aterrados (o que não permite produção de grandes volumes de chorume de grande densidade). Contudo, mesmo de baixa concentração a contaminação ocupa grande parte dos aquíferos freáticos situados na área urbana e estas águas não são adequadas para o abastecimento humano.

Os principais indicadores da contaminação oriunda pela degradação dos resíduos incluem: amônia, DQO (Demanda Química de Oxigênio), cloreto, sódio, cálcio e magnésio. Os metais pesados ocorrem sempre abaixo dos valores de intervenção e se mostram, na maior parte das análises, menores que os limites de detecção dos métodos analíticos.

Em função da dinâmica de evolução e migração das plumas de contaminação do aquífero freático a consequente poluição dos recursos hídricos superficiais é atenuada. A pluma de contaminação migra em direção às nascentes dos córregos Cabeceira do Valo e Acampamento e do Ribeirão Bananal. Os dados atuais indicam que a cabeceira do Ribeirão Bananal ainda está totalmente preservada da contaminação pela pluma de chorume, e as águas apresentam qualidade de água bruta potável (classificada como da Classe Especial). A nascente do córrego do Acampamento já apresenta os primeiros efeitos da chegada da pluma de contaminação, entretanto, nesta região a pluma alcança a zona de descarga com baixíssima concentração de contaminantes. A área em que a pluma migra para o interior da área do Parque Nacional é responsável pela diluição da pluma que pode baixar a concentração da contaminação da ordem de 1000 mg/L para valores da ordem de 20 mg/L de contaminantes.

A contaminação dos solos também apresenta um padrão inferior à expectativa, quando se observa as porções superficiais dos perfis pedogenéticos na região do lixão e adjacências. Quando se avalia as terras em aterros e áreas que tiveram decapeamento da superfície se observa grande volume de resíduos com destaque para fragmentos de vidro, restos de plástico, fragmentos de metais e acúmulo de matéria orgânica (coloração escura). Entretanto, quando se avalia os resultados de análises químicas de solos coletados próximo à superfície e a profundidades de até 60 cm se verifica restritos teores de metais biodisponíveis (cuja extração para análise foi feita pelo método Mehlich 1). Dentre os principais indicadores de contaminação em áreas situadas no perímetro do lixão destacam-se cálcio, magnésio, ferro, cobre e chumbo. Quando se avalia o conteúdo total de metais (com extração por fusão total a elevada temperatura) o cenário não modifica muito, sendo que apenas são observados maiores teores globais de metais e outras substâncias.

A contaminação dos solos não pode ser vista apenas pelos conteúdos anômalos de metais, e neste sentido, é possível confirmar a contaminação por efluentes de áreas urbanas não consolidadas (com percolação de efluentes não tratados), acúmulo de resíduos em áreas urbanas

e periurbanas e por agrotóxicos e fertilizantes nas áreas de produção agrícola intensiva com uso de irrigação. A associação de todas as fontes de contaminação, incluindo as acumulações de resíduos, comumente observadas no interior da área urbana, resulta em uma ampla poligonal com problemas de qualidade dos solos.

Com relação à contaminação atmosférica, na região em estudo, são consideradas quatro fontes de poluição: i) gases de efeito estufa com destaque para metano; ii) particulados totais em suspensão; iii) fumaça de queimadas florestais e de resíduos sólidos e iv) gases de combustão de motores a diesel (com intenso trânsito na área do lixão e área urbana adjacente). Dados preliminares de medição em 70 drenos verticais de gases indicam valores médios de 38% de metano (em percentual por volume) e de 33% dióxido de carbono (Del'Rey, 2020).

O volume de rejeito acumulado na área do Lixão (incluindo o período em que operou como depósito de lixo urbano e na fase atual de recebimento de entulhos) é de 26.904.613,05 m^3, o que resulta em uma massa de resíduos de 26.248.140 toneladas, considerando a densidade média de 0,9756 g/cm^3. Essas estimativas foram baseadas em análises gravimétricas do rejeito acumulado e no Modelo Digital de Elevação do maciço de rejeitos.

12. REFERÊNCIAS

ABNT 2004. Norma Brasileira 10.007. Amostragem de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 25p.

Bouwer, H.; Rice, R.C. 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resources Research, 12(3):423-428.

Campos, J.E.G. 2007. Análise e delimitação da pluma de contaminação do Aterro do Jockey, Região da Vila Estrutural - DF. 11p.

Campos, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: base para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Rev. Bras. Geogr., 34(1):41-48.

Campos, J.E.G. 2012. Geologia do Distrito Federal. In: Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. Volume II, Meio Físico. SEDUH / GDF.

Campos, J.E.G.; Santos L.M.; Seidel; A.M. 2006. Estudos geotécnicos preliminares e caracterização dos limites da área do antigo aterro na região da Vila Estrutural - DF. Água e Terra Consultoria e Planejamento Ambiental. Relatório Técnico. 70 p.

Carneiro, G.A. 2002. Estudo da contaminação do lençol freático sob área do aterro de lixo do Jockey Club - DF e suas adjacências. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade de Brasília. 123p.

Cavalcanti, M.M. 2013. Monitoramento geoelétrico da pluma de contaminação gerada pelo Lixão da Estrutural. Dissertação de Mestrado em Geociências Aplicadas - Universidade de Brasília.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB. 2013. Padrões de qualidade do ar. https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB. 2016. Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-de-solo-agua-subterranea/

Conama 357. 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução de 17 de março de 2005.

Conama 491. 2018. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. Resolução de 19 de novembro de 2018.

Del'Rey, G.O. 2020. Metanogênese e variações isotópicas do carbono em ambiente de deposição de resíduos sólidos: o Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília, DF. (Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências). 93p.

Elis, V.R. 1998. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 264p.

Fetter, C.W. 2004. Applied Hydrogeology. Fourth Edition. MacMillan College Publ. Co. New York. 619 pp.

Fetter, C.W.; Boving, T.; Kreamer, D. 2018. Contaminant Hydrogeology. Third Edition. Waveland PressInc. Long Groove, Illinois. 647p.

Fiori, J.P.O. 2010. Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Dissertação de Mestrado, 107p.

Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, New York. 604pp.

Gallas, J.D.F. 2000. Principais métodos geoelétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 258p.

Guedes, V.J.C.B. 2019. Caracterização da assinatura sísmica e geolelétrica do Aterro Jockey Clube de Brasília. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geofísica. Universidade de Brasília. 77p.

Instituto Brasília Ambiental. Secretaria do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. 2008. Relatório do Monitoramento da Qualidade do ar no Distrito Federal. GDF. 35p.

Loke, M.H., 2004. Res2Dinv versão 3.54 for Windows 98/Me/2000/NT/XP. Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method. Software Manual. 133 p. Disponível em: http://www.geoelectrical.com

Pede, M.A.Z. 2004. Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na região metropolitana de São Paulo. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Rio Claro, Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Dissertação de Mestrado, 95p.

Souza, M.T. Fundamentos para Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Distrito Federal. Brasília. (Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências). 94p.

Stollberg, R., Weib, H. 2011. Municipal waste disposal Lixão do Jóquei, Brasília, Distrito Federal do Brasil: hydrochemical analysis. Status Report I. Project: IWAS Águas DF, Sub-project 3 Site investigation, groundwater monitoring, and "Hydrological cycle". HELMOLTZ (Centre for Environmental Research - UFZ). 38p.

Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

Ward, O.S.H. 1990. Resistivity and Induced Polarization Methods. Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, p. 147-189.