

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

PRODUTO 4

**MODELO BÁSICO CONCEITUAL DA CONTAMINAÇÃO E SISTEMA
PILOTO DE REMEDIAÇÃO DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA**

Brasília, Junho de 2021.

SUMÁRIO

SUMÁRIO EXECUTIVO.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS CONTAMINADAS.....	4
3. MODELO BÁSICO CONCEITUAL DA CONTAMINAÇÃO E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL .	7
3.1 Contaminação das Águas Subterrâneas	12
3.2 Degradação dos Solos.....	19
3.3 Contaminação das Águas Superficiais.....	19
3.4 Poluição Atmosférica.....	20
4. SISTEMAS PILOTOS DE REMEDIAÇÃO E MITIGAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL	21
4.1 Considerações Iniciais	21
4.2 Fitorremediação de Solos Contaminados por Metais	24
4.3 Estabilização de Metais no Solo	33
4.4 Recomposição da Vegetação Natural em Áreas Expostas e Degradadas	48
4.5 Estabilização da Pluma de Contaminação	53
4.6 Tratamento de Efluente da Pluma de Contaminação.....	58
5. ANÁLISE DE VIABILIDADE AMBIENTAL, TÉCNICA E ECONÔMICA	60
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
8. EQUIPE TÉCNICA	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do modelo conceitual para o gerenciamento de áreas contaminadas e degradadas pelo Lixão e Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural. A pluma migra lateralmente por processos de dispersão e advecção. Os gases de efeito estufa, gases de combustão de óleo diesel e particulados são disseminados a partir de correntes de ventos (principalmente no período seco do ano). A contaminação do Córrego Cabeceira do Valo se dá pela descarga do aquífero pela sua margem esquerda e se dispersa com o próprio fluxo da água; a descarga a partir da margem direita causa diluição da contaminação (por se tratar de águas de boa qualidade química). A degradação dos solos se dá pela supressão dos horizontes superficiais e por restos de rejeitos não removidos.....	10
Figura 2 - Mapa de distribuição da concentração de cloreto (em mg/L) na área do antigo Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos.	15
Figura 3 - Mapa de distribuição da concentração de sódio na área do Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos (em mg/L).	16
Figura 4 - Mapa de isoconcentração da Demanda Química de Oxigênio DQO na área do Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos (em mg/L).	17
Figura 5 - Mapa da pluma de contaminação das águas subterrâneas no Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos, com base na condutividade elétrica das águas em $\mu\text{S}/\text{cm}$	18
Figura 6 - A - Situação da área do plantio no âmbito da poligonal do Lixão da Estrutural. B - Poligonais dos perímetros plantados. Em vermelho, limite do plantio de espécies arbóreas e arbustivas nativas do cerrado e mata galeria. Em amarelo, área do plantio de eucalipto. Em azul área de plantio de Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>). Em cor laranja, plantio de Girassol (<i>Helianthus annuus</i>). Imagem do Google Earth de 29 de maio de 2020.	31
Figura 7 - Localização da área de desenvolvimento do experimento.	34
Figura 8 - A: Sítio experimental arado e gradeado após a primeira etapa de amostragem. B: Local com incorporação do pó de dolomito e irrigação localizada com 40 litros de água para potencializar a incorporação do carbonato de cálcio e magnésio ao perfil de solo.	35
Figura 9 - Tradagem manual durante amostragem do solo nas proximidades dos locais demarcados em que a dosagem de dolomito foi ampliada e onde foi realizada a irrigação localizada.....	35
Figura 10 - Difratogramas de Raios X das amostras ISO-01A, ISO-01B, ISO-13A, e ISO-13B. tot = Total - pó prensado sobre a lâmina; e n = Normal - fração argila separada seca ao ar e orientada sobre a lâmina.	38
Figura 11 - Pontos coletados na primeira e segunda séries de amostragens.	41
Figura 12 - Influência do pH sobre a adsorção de alguns metais e oxidação metálicos sobre hidróxidos de Fe amorfo.	44
Figura 13 - Solubilidade de metais pesados em função do pH e de Eh (na ausência de matéria orgânica dissolvida ou sólida) (a) os principais minerais que controlam a solubilidade do metais pesados; (b) tendência de aumento da solubilidade dos metais.	45
Figura 14 - Moto-coveadora em operação em campo. Este sistema manual permite a perfuração de uma “cova” cilíndrica de até 60 cm de profundidade com 10 cm de diâmetro.....	50
Figura 15 - Irrigação manual com uso de regadores e água bruta captada no córrego Cabeceira do Valo em reservatório de 1000 litros.	51
Figura 16 - Formigas cortadeiras em ataque a muda recém-plantada.	52
Figura 17 - Cobertura de NPK em planta em início de desenvolvimento. Os grânulos devem ser depositados na depressão da cova original para se ampliar a efetividade da fertilização.	52
Figura 18 - Recobrimento do pé da planta com capim seco para manutenção da umidade, principalmente no período seco do ano.	53
Figura 19 - Carta imagem com a localização dos poços que deverão compor cada bateria de bombeamento. Imagem de 29 de maio de 2020 obtida do sistema Google Earth.....	55
Figura 20 - Ilustração do sistema de contenção da pluma por barreira hidráulica. Em projeção horizontal (superior) e em seção (inferior). Com a contenção da pluma, a água que flui em direção ao poço municipal ou para o curso d’água superficial é desprovida dos contaminantes.	56
Figura 21 - Perfil típico do poço individual que deverá compor cada bateria de rebaixamento.	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ementas e objetivos das normas brasileiras (NBRs) relacionadas aos estudos de passivos ambientais e assuntos correlatos.....	5
Tabela 2 - Localização dos espécimes vegetais amostrados na área de Lixão da estrutural.	25
Tabela 3 - Localização dos espécimes vegetais amostrados na área do Campus Universitário Darcy Ribeiro e adjacências.....	26
Tabela 4 - Resultados das análises químicas de massa foliar de plantas nativas e exóticas amostradas na área do Lixão da Estrutural e no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.	29
Tabela 5 - Localização dos pontos de amostragem das plantas de ciclo curto.....	30
Tabela 6 - Resultados das análises de massa foliar de girassol após seu ciclo de desenvolvimento.....	32
Tabela 7 - Resultados das análises dos teores de metais em massa foliar e grãos de sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>), após crescimento e secamento.	32
Tabela 8 - Resultados da Difratometria de Raios-X.....	37
Tabela 9 - Resultados das análises dos teores dos elementos na primeira série de amostragem e do dolomito.	39
Tabela 10 - Resultados das análises dos teores dos elementos na segunda série de amostragem.	40
Tabela 11 - Resultados de medição de pH em água e KCl e do dolomito usado no experimento da primeira e segunda campanhas de amostragem.....	42
Tabela 12 - Mobilidade relativa dos metais pesados segundo o Eh e pH do solo. Fonte: Plant & Raiswell (1983).	44
Tabela 13 - Disponibilidade relativa de metais retidos no solo para plantas.....	45
Tabela 14 - Resultados de análises submetidas a agitação e contato com zeólita granular. CE em $\mu\text{S}/\text{cm}$ e demais substâncias em mg/L. Em verde destacadas as substâncias que sofreram redução e em amarelo aquelas que sofreram elevação.	59
Tabela 15 - Discriminação da viabilidade das ações propostas para mitigação dos impactos decorrentes da operação do Lixão da Estrutural.	60
Tabela 16 - Dados de análises de amostras coletadas em poços de monitoramento sobre o lixão e adjacências. Profundidade de amostragem em metros; Condutividade Elétrica em $\mu\text{S}/\text{cm}$; Temperatura em $^{\circ}\text{C}$; demais substâncias em mg/L. LQ - limite de quantificação do método analítico.	68
Tabela 17 - Histórico dos dados de níveis freáticos em poços de monitoramento (medidas em metros).	69
Tabela 18 - Histórico dos dados de temperatura das águas de amostras obtidas de poços de monitoramento (medidas em $^{\circ}\text{C}$).....	70
Tabela 19 - Histórico dos dados de condutividade elétrica das águas em poços de monitoramento (resultados em $\mu\text{S}/\text{cm}$).....	71

SUMÁRIO EXECUTIVO

O presente documento técnico representa o Produto 4 no âmbito do contrato no 101/2019 celebrado entre o Global Environment Facility (GEF) “*Promovendo Cidades Sustentáveis no Brasil*”, coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), em parceria com a ONU Meio Ambiente e o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), com a Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC).

Nesta etapa são apresentados o modelo conceitual da contaminação e os resultados dos projetos pilotos realizados desde o início do desenvolvimento do projeto, bem como enumeradas as ações destinadas à eliminação ou mitigação dos impactos.

Os estudos de diagnóstico indicam que a questão ambiental mais crítica observada na região é a contaminação das águas subterrâneas freáticas a partir da formação de uma pluma de contaminação de chorume. A expansão desta pluma já acarretou na contaminação do córrego Cabeceira do Valo que drena a porção oeste do lixão. O desenvolvimento horizontal da pluma foi devidamente mapeado, e os dados ainda permitiram definir os locais em que a pluma se encontra estratificada. Importante salientar que apenas os aquífero freáticos vinculados ao manto de intemperismo estão contaminados, e que a contaminação ainda não se estendeu para os aquíferos fraturados mais profundos.

A área ainda apresenta impactos devidos à contaminação atmosférica por gases de efeito estufa produzidos pela decomposição dos resíduos orgânicos (com destaque para o metano e dióxido de carbono). Atualmente estes gases canalizados por sistemas de drenos verticais (manilhas de concreto preenchidas por blocos de rocha) e são queimados.

A degradação dos solos e da vegetação natural foi identificada a partir da remoção dos horizontes superficiais e supressão do cerrado nativo em locais onde foram depositados e posteriormente retirados os resíduos (principalmente na faixa de 300 metros situada entre a cerca limítrofe do limite do Parque Nacional de Brasília o limite leste da área de efetiva acumulação de detritos).

Para interromper a migração e espalhamento da pluma de chorume foi proposta a instalação de barreiras hidráulicas representadas por baterias de poços localizados em porções marginais das áreas com maiores concentrações de contaminantes. A proposição das barreiras hidráulicas foi realizada a partir de dados hidráulicos das zonas saturada e não saturada dos aquíferos e dos dados de testes de bombeamento em poços de monitoramento. O efluente produzido a partir do rebaixamento do aquífero pode ser submetido a duas rotas: tratamento e lançamento final em curso d'água natural receptor ou reinjeção no maciço de resíduos (com conseqüente atenuação a partir de processos geoquímicos). A alternativa a ser adotada dependerá da avaliação econômica, ambiental, além de outras variáveis de decisão.

Visando à recuperação das áreas degradadas por acúmulo e remoção dos resíduos, é proposta a recomposição da vegetação nativa, com utilização de espécies arbóreas de médio e grande porte do Cerrado e de Mata Galeria.

Ainda no sentido de eliminação e mitigação dos efeitos deletérios do antigo lixão e de preservação ambiental da área são propostas as seguintes ações: impermeabilização e instalação de drenagem de águas pluviais da porção norte da área, a qual representa o atual foco de produção ativa de choro primário. As águas interceptadas pelo sistema de drenagem deverão ser infiltradas nas áreas marginais do aterro de resíduos para maximizar a diluição da pluma de contaminação em um processo de tratamento *in situ*.

Os projetos pilotos realizados visaram à eliminação da contaminação de metais nos solos, tendo sido consideradas técnicas de fitorremediação e estabilização para conter a biodisponibilidade destas substâncias tóxicas. Contudo, após a avaliação dos resultados de análises dos solos em diferentes profundidades e em diferentes condições de exposição (áreas adjacentes ao maciço de resíduos, áreas sobre o maciço de resíduos e áreas no interior do Parque Nacional de Brasília) se constatou baixos teores de metais. Desta forma, as técnicas utilizadas se mostraram restrita aplicabilidade ao contexto estudado, entretanto, os resultados indicam que estas metodologias podem ser utilizadas em áreas com efetiva contaminação das porções superiores dos perfis de solos.

As ações propostas para minimização dos impactos e ampliação da proteção ambiental da área ainda deverão ser submetidas a análises e avaliações de viabilidade econômica, o que deverá ser apresentado no Produto 5 deste projeto.

1. INTRODUÇÃO

Nesta etapa dos estudos serão apresentados o Modelo Conceitual da Contaminação e a descrição dos Sistemas Pilotos de Remediação. O modelo e as propostas de remediação são exclusivamente baseados no diagnóstico ambiental consolidado apresentado no Produto 3 deste mesmo projeto. Este diagnóstico determinou que a contaminação das águas subterrâneas é a questão ambiental mais relevante relativa à operação do antigo Lixão da Estrutural até janeiro de 2018 e à operação da Unidade de Recebimento de Entulhos, desde então, até o presente momento.

Os estudos de diagnóstico ambiental, ainda mostraram que são três os aspectos críticos da degradação ambiental causados pela antiga operação do lixão na região e pela atual operação da Unidade de Recebimento de Entulhos: contaminação dos aquíferos freáticos por chorume; poluição atmosférica (principalmente no período seco do ano) e degradação dos solos pela acumulação / remoção de resíduos sólidos.

Adicionalmente, a operação da atual Unidade de Recebimento de Entulhos ainda causa impactos significativos ao Parque Nacional de Brasília, com destaque para produção de particulados que em parte afetam a unidade de conservação, nucleação de queimadas que comumente adentram a área desta unidade de conservação ambiental e atração de catadores de resíduos que também interferem na área do Parque Nacional de Brasília.

Uma questão relevante que ocorre na região é a ocupação denominada “Santa Luzia” que representa uma invasão de terras com fracionamento em pequenos lotes, sem nenhum controle ambiental que inclusive se estendeu até a cerca limítrofe do Parque Nacional de Brasília. Esta ocupação já gera efluentes que escoam para o interior da área da Unidade de Conservação e que poderá alcançar a nascente do Córrego do Acampamento. Apesar da importância, este tema não será tratado neste estudo, uma vez que extrapola o escopo ambiental que é o tema principal do projeto e não consta do Termo de Referência que define as diretrizes do estudo em desenvolvimento. A questão social deve ser tratada por profissionais habilitados com participação ativa de diferentes órgãos do Governo do Distrito Federal.

Para que o presente produto tenha maior alcance em termos de auxiliar na abordagem dos problemas da contaminação e responder aos questionamentos de outros órgãos do Governo do Distrito Federal, notadamente ao Instituto Brasília Ambiental - IBRAM, sua apresentação será enquadrada em normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Neste sentido, são citadas a NBR 16210-1: “Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas - Procedimento” e NBR 16784-1: “Reabilitação de áreas contaminadas - Plano de intervenção. Parte 1: Procedimento de elaboração”.

2. IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS CONTAMINADAS

O diagnóstico ambiental da área estudada (Produto 3 deste projeto) traz o mapeamento dos compartimentos contaminados (com exceção da contaminação atmosférica).

Neste sentido, está discriminado o mapa de distribuição da pluma de contaminação por chorume, além de outros mapas temáticos relacionados: mapa da espessura da zona não saturada, mapa potenciométrico natural e atual e mapa de sentido de migração da pluma. Estes mapas foram produzidos a partir dos dados das análises de amostras obtidas dos poços de monitoramento e auxílio de geoprocessamento.

Com relação à distribuição vertical da contaminação, foi constatada que a pluma se apresenta estratificada nas proximidades dos centros geradores. A estratificação que é devida à recarga natural por águas de chuvas e aos processos de misturas de soluções, se torna homogênea nas porções mais distais. A homogeneização se dá devido à grande solubilidade dos componentes majoritários que compõem o chorume (cloreto, sódio, série nitrogenada, cálcio, magnésio, e outros), além da diminuição progressiva de sua densidade ao longo das linhas de fluxo.

Com relação às águas superficiais foi apresentado o mapa de qualidade dos recursos hídricos superficiais, confirmando as informações existentes. Apenas o córrego Cabeceira do Valo apresenta contaminação determinada pela descarga da pluma de contaminação subterrânea.

Os valores de *background* das substâncias químicas de interesse associadas a cada compartimento contaminado são: águas subterrâneas e superficiais: ausência de amônia, DQO menor que 0,1 mg/L; sódio < 1,5 mg/L; cloreto < 2,0 mg/L e cálcio < 2,5 mg/L;

Os solos afetados por diferentes formas de degradação foram espacializados e os resultados estão apresentados no mapa de qualidade dos solos, com as seguintes classes de contaminação potencial: i) por fertilizantes e agroquímicos (área de produção de hortaliças), efluentes domésticos (escoamento a partir da ocupação Santa Luzia), áreas de acumulação e remoção de resíduos sólidos (área embargada), área com acumulação de resíduos em baixa densidade (porção sul da área principal do lixão) e área com acumulação vertical de grandes volumes de rejeitos (corpo principal do maciço do lixão). Além deste mapa, ainda foi proposto o mapa de volumes de resíduos com 3 classes discriminando locais com baixa, moderada e elevada densidade de resíduos.

Para os solos foram considerados os valores de referência de qualidade e os valores de prevenção propostos pela CETESB (2016).

Os estudos de passivos ambientais e de gerenciamento de áreas contaminadas adotam roteiros metodológicos e diretrizes, segundo normas específicas da ABNT (Tabela 1) e a Resolução 420 do CONAMA (Conama, 2009), incluindo as seguintes etapas:

- Avaliação preliminar;
- Investigação confirmatória;
- Investigação detalhada;
- Avaliação de risco;
- Plano de intervenção;
- Monitoramento.

Ano de publicação ou atualização	Número da NBR: Ementa	Objetivos
2013c	16209: Avaliação de risco a saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas.	Estabelece os procedimentos de avaliação de risco à saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas em decorrência da exposição a substâncias químicas presentes no meio físico.
2013a	16210: Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas - Procedimento.	Estabelece os procedimentos e conteúdos mínimos para o desenvolvimento de modelos conceituais em objeto de estudo.
2011a	15515-1: Passivo ambiental em solo e água subterrânea. Parte 1: Avaliação preliminar.	Estabelece os procedimentos mínimos para avaliação preliminar de passivo ambiental visando a identificação de indícios de contaminação de solo e água subterrânea.
2011b	15515-2: Passivo ambiental em solo e água subterrânea. Parte 2: Investigação confirmatória.	Estabelece os requisitos necessários para o desenvolvimento de uma investigação confirmatória em áreas onde foram identificados indícios reais ou potenciais de contaminação de solo e água subterrânea após a realização de uma avaliação preliminar.
2013b	15515-3: Avaliação de passivo ambiental em solo e água subterrânea. Parte 3 - Investigação detalhada.	Estabelece os procedimentos mínimos para a investigação detalhada de áreas onde foi confirmada contaminação em solo ou água subterrânea com base em série histórica de monitoramento, avaliação preliminar, investigação confirmatória ou estudos ambientais.
2020	16784-1: Reabilitação de áreas contaminadas - Plano de intervenção Parte 1: Procedimento de elaboração.	Estabelece o procedimento para a elaboração de planos de intervenção para reabilitação de áreas contaminadas, contemplando a definição de medidas de intervenção, a apresentação do modelo conceitual de intervenção e o relatório técnico do plano de intervenção.

Tabela 1 - Ementas e objetivos das normas brasileiras (NBRs) relacionadas aos estudos de passivos ambientais e assuntos correlatos.

Como o caso em estudo é uma questão particular, de um passivo / ativo ambiental de grande porte por ser vinculado ao um dos maiores locais de acumulação de resíduos urbanos do Brasil o tratamento do ponto de vista do método de estudo deve ser adaptado.

Desta forma as etapas de *avaliação preliminar* e de *investigação confirmatória*; são consideradas como já alcançadas pelos inúmeros estudos já realizados na área, desde 1996 até 2020. Neste conjunto, embora não formalizado sob a ótica das normas, os resultados de dissertações de mestrado, teses de doutorado, relatórios técnicos, relatórios de operação do lixão / Unidade de Recebimento de Entulhos, estudos ambientais para licenciamento e manutenção das licenças de operação dentre outros, representam o histórico da contaminação e a confirmação da contaminação dos diferentes compartimentos e tipos de contaminantes.

O diagnóstico ambiental, formalizado como o Produto 3 deste projeto representa a investigação detalhada. Naquele documento é possível verificar o detalhamento da contaminação das águas subterrâneas e superficiais, a degradação da vegetação nativa e dos solos por impermeabilização, acumulação de diferentes volumes de resíduos e escoamento superficial de efluentes e uso para agricultura intensiva. O fator que deve ser destacado é a exceção para a contaminação atmosférica, que não foi estudada suficientemente, sendo ainda necessário intensificar os esforços para melhor entendimento sobre a produção de gases pela decomposição dos resíduos.

As ações que compõem o plano de intervenção serão apresentadas preliminarmente neste relatório e detalhadas no próximo relatório deste projeto (Produto 5) incluindo as iniciativas para minimizar os impactos e a avaliação econômica para sua implantação. Dentre as ações são enumeradas: estabilização da pluma de contaminação a partir da instalação e operação de barreiras hidráulicas; tratamento ou reinjeção dos efluentes bombeados para a estabilização da pluma de contaminação; enclausuramento da principal zona de geração de chorume primário; e recomposição da vegetação nativa na área embargada para acumulação de resíduos. Além das ações de mitigação / recuperação propriamente ditas, também será apresentada uma proposta para uso futuro da área.

O monitoramento ambiental de toda a região deverá ser continuado e realizado antes, durante e depois de implantadas as ações de minimização dos impactos. Neste esforço deverão ser monitorados os seguintes compartimentos: a qualidade das águas subterrâneas (a partir de poços de monitoramento) e das águas superficiais (manutenção dos pontos de controle), a qualidade do ar (com a instalação de uma estação de medição de particulados totais e suspensão), o crescimento da vegetação nativa reintroduzida (com medição do desenvolvimento de espécies selecionadas) e a efetividade do sistema de impermeabilização e canalização das águas pluviais (com avaliação visual e registro fotográfico dos sulcos e outros processos erosivos lineares).

3. MODELO BÁSICO CONCEITUAL DA CONTAMINAÇÃO E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

A contaminação e degradação da área do Lixão da Estrutural (atual Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural) e adjacências são integralmente associadas ao uso da região como área de destinação final dos resíduos sólidos urbanos do Distrito Federal por quase seis décadas.

A degradação dos solos, a contaminação das águas subterrâneas, das águas superficiais e a poluição do ar são vinculadas diretamente aos resíduos e sua decomposição ou ao manejo da área para recebimento dos resíduos.

Segundo ABNT (2013) tendo como base a NBR 16210, o modelo conceitual deve ter um conteúdo mínimo e um escopo que contemple os seguintes itens (texto adaptado da referida Norma Técnica):

i) determinação dos limites da área objeto de estudo e resumo das informações históricas de uso e ocupação, com a representação da área objeto de estudo e seu entorno, reunindo dados e informações históricas e atuais relacionadas ao local, a partir de mapas, imagens aéreas, seções transversais, dados ambientais, registros de níveis de poços e parâmetros físico-químicos das águas, relatórios, estudos e outras fontes de informação. No presente estudo essa etapa foi alcançada nos estudos de diagnóstico ambiental da área com análises de solos, estudos geofísicos, instalação de poços de monitoramento, análises de massa foliar da vegetação nativa e exótica encontrada na área, análises de águas superficiais e subterrâneas dentre outras ações. O histórico de acumulação de resíduos e ocupação urbana da área adjacente ao lixão. Diversos estudos já apresentaram o histórico, sendo que o trabalho de Cunha *et al.* (2021) é um dos mais recentes com este mesmo objetivo;

ii) determinação das fontes de contaminação, com identificação e caracterização das potenciais, suspeitas e reais fontes de contaminação através da indicação de sua localização (externa ou interna na área objeto de estudo) e seus limites; as substâncias químicas de interesse, suas áreas, seus volumes, concentrações médias na fonte, além das taxas e mecanismos de dispersão dos contaminantes. Esta ação foi plenamente desenvolvida a partir dos resultados de análises químicas de solos e águas, sendo que além dos principais contaminantes, foram determinados os indicadores das diferentes fontes de poluição;

iii) identificação das substâncias químicas de interesse, com a identificação dos contaminantes existentes na água subterrânea, nas águas superficiais, nos solos, nos sedimentos, na biota e no ar, bem como seu comportamento físico-químico típico em cada meio. Esta etapa foi contemplada, com exceção de contaminantes eventualmente presentes na fauna, os quais não foram analisados por este projeto;

iv) *ocorrência natural das substâncias de interesse*, deve ser avaliada a possibilidade de ocorrência natural das concentrações das substâncias químicas de interesse, bem como seus valores de *background* para se distinguir a real contaminação. Os valores de *background* químicos nas águas dos aquíferos foram obtidos do trabalho de Arraes *et al.* (2005) e os valores de referência para os solos foram obtidos a partir de resultados analíticos de áreas não sujeitas à contaminação;

v) *avaliação da possibilidade de mobilização de substâncias naturais em função da interação destas com o contaminante, além dos processos envolvidos na distribuição dos contaminantes*. A liberação dos contaminantes da água subterrânea se dá por advecção, fluxo lateral e descarga do aquífero. A liberação dos contaminantes atmosféricos se dá através dos sistemas de drenos de gases instalados no maciço de resíduos;

vi) *caracterização do meio físico*, com a descrição das características geológicas, pedológicas, hidrogeológicas, geoquímicas, hidrológicas, geomorfológicas e outras características consideradas relevantes para o estudo. No caso do presente estudo todos estes parâmetros estão devidamente apresentados e atualizados no Produto 3, sendo a sintetizados a seguir: Geologia - formações Ribeirão Piçarrão e Ribeirão do Torto do Grupo Paranoá de idade Mesoproterozoica; Pedologia - Latossolos vermelhos distróficos de textura muito argilosa; Hidrogeologia - Sistema P1 do domínio intergranular e Subsistemas S e S/A do Sistema Paranoá; Hidrologia: bacias do Córregos Cabeceira do Valo (a oeste), do Ribeirão Bananal (a nordeste) e do córrego do Acampamento (a leste); Geomorfologia - compartimento da Depressão do Paranoá nos domínio do Plano Intermediário. O detalhamento do meio físico se encontra disponível no Produto 3 deste projeto.

vii) *identificação, caracterização e localização das potenciais, suspeitas e reais fontes de contaminação* - etapa concluída com o mapeamento da pluma de contaminação do aquífero freático, com o mapeamento das áreas de acumulação dos resíduos, com as análises gravimétricas *ex situ* dos resíduos sólidos, com as análises nas áreas de nascentes e com o conjunto de análises químicas realizadas em amostras de solos e de águas;

viii) *as vias de transporte dos contaminantes*, incluindo os principais meios de migração através da água subterrânea, água superficial, ar, solo, sedimento e biota, devendo ser identificados para cada fonte e classificados em potenciais, suspeitas ou reais. No caso da área em estudo os meios de dispersão da contaminação são o aquífero freático, o Córrego Cabeceira do Valo, o escoamento das águas superficiais, os latossolos das áreas adjacentes e o ar atmosférico, com suas correntes de ventos;

ix) *identificação e caracterização dos receptores da contaminação* - com relação aos compartimentos do meio físico considerados receptores naturais da contaminação destacam-se:

os aquíferos freáticos e as nascentes e os córregos Cabeceira do Valo, Acampamento e Bananal como receptores da contaminação das águas; a própria atmosfera como receptora da contaminação por gases de efeito estufa; e os horizontes A e AB dos perfis pedogenéticos como receptores da contaminação e degradação dos solos. Com relação aos receptores do meio biótico destacam-se: a vegetação nativa e exótica como receptores de toda a carga de contaminantes; os organismos terrestres e aquáticos como receptores da contaminação dos cursos d'água; e os seres humanos como receptores potenciais da contaminação das águas e da atmosfera.

x) bens a proteger - os bens naturais a serem protegidos incluem o aquífero freático (que deverá ter o fluxo invertido e os efluentes tratados ou recirculados), os solos (que deverá ter sua cobertura vegetal recomposta com uso de espécies nativas), a atmosfera (que deverá receber o mínimo de gases com o menor grau possível de agressividade) e as águas superficiais (que deverão ter sua classificação mantida na Classe Especial ou melhorada para classe imediatamente inferior, no caso do Córrego Cabeceira do Valo). Além dos bens anteriormente enumerados, também deve ser protegida a saúde respiratória dos residentes nas áreas adjacentes ao Lixão / Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural.

Segundo ABNT (2013) “um modelo conceitual é a representação escrita ou gráfica de um sistema ambiental e os processos biológicos, químicos e físicos, que determinam o transporte dos contaminantes a partir das fontes, através dos meios, até os receptores envolvidos”.

Os estudos prévios de diagnóstico mostram que os problemas ambientais podem ser hierarquizados em função de sua magnitude, intensidade e criticidade, da seguinte forma:

- 1) contaminação das águas subterrâneas;
- 2) degradação dos solos;
- 3) contaminação das águas superficiais;
- 4) poluição atmosférica.

A contaminação dos solos que um aspecto inicialmente considerado como potencialmente crítico se mostrou como um fator de menor importância, sendo vinculado ao tipo de resíduos acumulados.

A Figura 1 mostra de forma esquemática o modelo conceitual da contaminação e degradação geradas pelo antigo Lixão da Estrutural e operação atual da Unidade de Recebimento de Entulhos.

Em seguida são descritos os modelos conceituais de geração e propagação dos efluentes responsáveis pela degradação ambiental da área do Lixão e imediações.

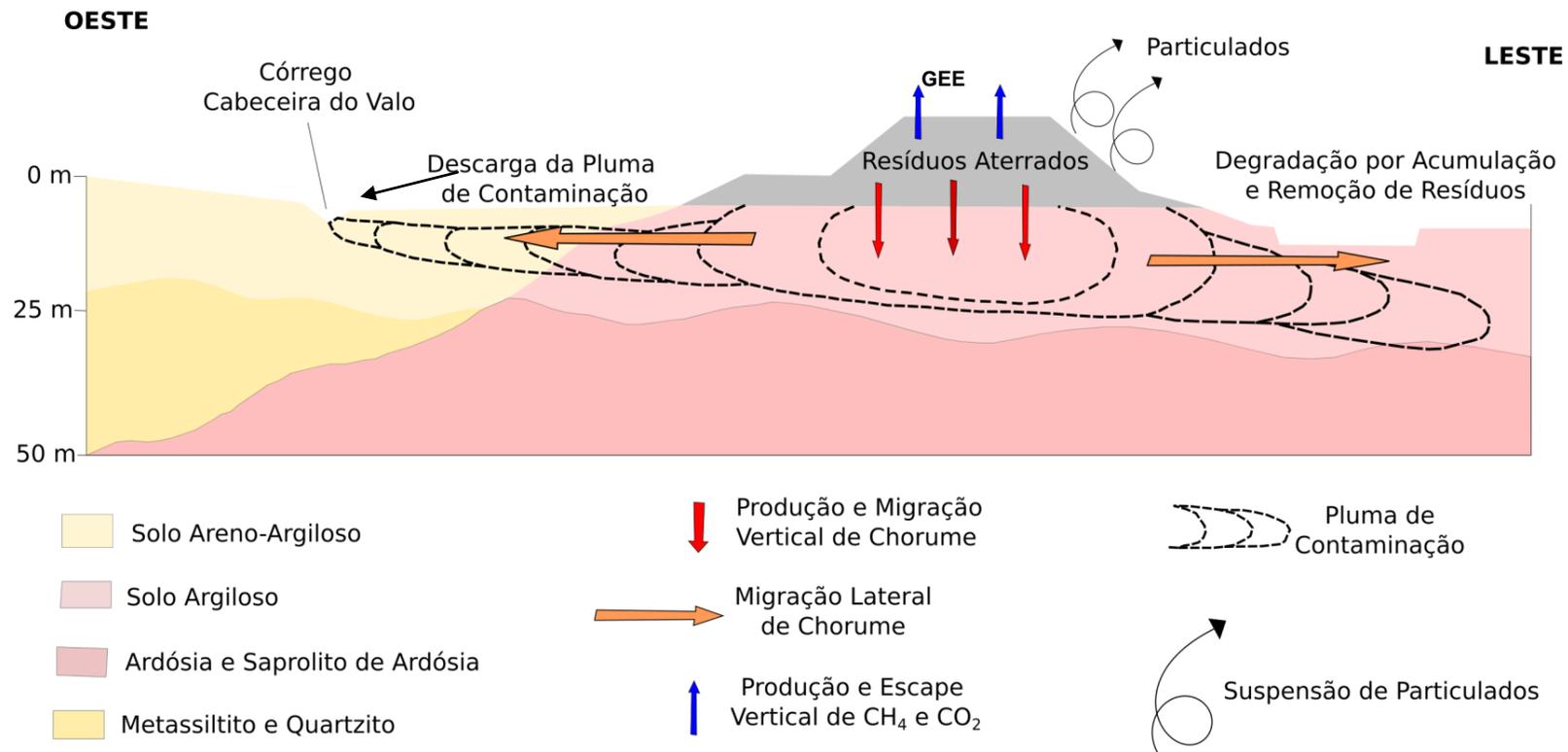


Figura 1 - Representação esquemática do modelo conceitual para o gerenciamento de áreas contaminadas e degradadas pelo Lixão e Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural. A pluma migra lateralmente por processos de dispersão e advecção. Os gases de efeito estufa, gases de combustão de óleo diesel e particulados são disseminados a partir de correntes de ventos (principalmente no período seco do ano). A contaminação do Córrego Cabeceira do Valo se dá pela descarga do aquífero pela sua margem esquerda e se dispersa com o próprio fluxo da água; a descarga a partir da margem direita causa diluição da contaminação (por se tratar de águas de boa qualidade química). A degradação dos solos se dá pela supressão dos horizontes superficiais e por restos de rejeitos não removidos.

O conjunto de dados levantados no estudo de diagnóstico ambiental é considerado robusto e suficiente para responder a todas as demandas das normas técnicas.

Mesmo não considerando a instalação de poços multiníveis, a rede de poços de monitoramento com seções filtrantes em duas ou três profundidades foi suficiente para a determinação tridimensional da pluma de contaminação. Esta rede de poços permitiu inclusive o mapeamento da estratificação da pluma de chorume, bem como sua profundidade máxima de alcance. Os dados do par de poços Raso e Profundo (Poço 18) operado pela ADASA, também ratificam que a contaminação está situada apenas no aquífero freático, ainda não tendo afetado o aquífero fraturado situado a maior profundidade.

A eventual limitação da rede de monitoramento das águas subterrâneas, em função da má distribuição ou de vazios amostrais não é função de limitação técnica, mas sim de limitações logísticas, uma vez que na área urbana com elevada densidade e traçado urbanístico irregular não há espaço para a construção de poços ou realização de estudos geofísicos.

Os dados de águas superficiais, mesmo em número reduzido, são suficientes para as conclusões sobre a contaminação das águas superficiais, uma vez que foram obtidos de amostras de águas situadas em suas zonas de cabeceira, e em alguns casos muito próximo às nascentes, que é a área que deverá receber mais prontamente as eventuais contaminações.

Os dados obtidos do trabalho de Del'Rey (2020) confirmam a contaminação atmosférica e inclusive traz valores de razões de metano e gás carbônica nas saídas dos drenos de gases, bem como os processos envolvidos na sua geração.

Os resultados das análises gravimétricas dos resíduos mostram que os dois principais componentes enterrados são terra e restos de obras, seguidos de madeira. Este conjunto de materiais corrobora com os baixos teores de metais encontrados nos solos e no chorume (mesmo em sua fase de maior concentração sob a pilha de resíduos mais espessa e mais recentemente depositada).

Segundo a NBR 16209 (ABNT 2013a) a SQI ou Substância Química de Interesse representa a fase química quantificada em amostra proveniente do meio físico, que está relacionada à fonte primária ou secundária de contaminação.

As Substâncias Químicas de Interesse vinculadas à contaminação dos diferentes compartimentos são:

- Águas subterrâneas - amônia, Demanda Química de Oxigênio, cloreto, sódio, cálcio e magnésio. Os metais, ao contrário do que inicialmente considerado, não apresentam teores elevados uma vez que os resíduos são oriundos de fontes produtoras domésticas (resíduos urbanos). Além da fonte não produzir e acumular muito resíduo rico em metais, os processos de reciclagem que sempre existiram retiram grande parte das fontes potenciais destes materiais.

Além das Substâncias Químicas de Interesse propriamente ditas, no caso das águas subterrâneas o Nível Freático ou Carga Potenciométrica é muito importante, pois determina o sentido do fluxo e possibilita a estimativa da recarga. A condutividade elétrica (CE) da água é um fator diretamente proporcional ao Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) e também não é especificamente uma Substância Química de Interesse, mas deve ser considerada, pois retrata o total de íons presentes na água com forte proporcionalidade com relação às substâncias indicadoras da contaminação.

- Águas superficiais - amônia, nitrato, cloreto e sódio. Estas substâncias foram consideradas, pois são as principais que sofrem elevação com relação ao *background* regional. Neste caso a única drenagem que se apresenta contaminada pela descarga de chorume é o Córrego Cabeceira do Valo. A contaminação é atenuada, pois este córrego recebe descarga dos aquíferos pela sua margem direita o que minimiza fortemente o processo de poluição

- Atmosfera - metano. A Substância Química de Interesse associada à poluição atmosférica é um gás produzido por metanogênese *in situ* com a decomposição anaeróbia dos resíduos orgânicos. A possibilidade de inclusão de outras Substâncias Químicas de Interesse gasosas como CO₂ ou SO₂ é dificultada pela impossibilidade de se separar fontes de geração distintas (ex. CO₂ oriundo do Lixão e de combustão de combustíveis fósseis) ou pela questão de se determinar e medir alguns tipos de gases (ex. gases ricos em enxofre).

No caso dos solos que não apresentam valores de indicadores acima dos referenciais de qualidade não há uma Substância Química de Interesse específica, sendo a exposição de sua superfície, a presença de restos de resíduos, presença de vegetação exótica e pioneira com destaque para Margaridão (*Tithonia diversifolia*); Leucena (*Leucaena leucocephala*) e Mamona (*Ricinus communis L.*) e a ausência de vegetação natural os principais parâmetros a serem observados.

As Substâncias Químicas de Interesse deverão ser consideradas como principais parâmetros para análise e monitoramento, para que as intervenções propostas sejam focadas, isto é: redução de amônia, DQO, cloreto e sódio em águas subterrâneas, redução de amônia e nitrato no Córrego Cabeceira do Valo, substituição da vegetação exótica com a utilização de técnica de recomposição da vegetação nativa (na área embargada) e redução das emissões de metano.

3.1 Contaminação das Águas Subterrâneas

A contaminação dos aquíferos freáticos é desencadeada com a acumulação dos resíduos e seu aterramento. Inicialmente (até o ano de 1985) os resíduos eram tratados na forma de pequenas células relativamente rasas (até 5 metros de profundidade com extensão variável) que eram aterradas por solos locais, submetidos a pequena compactação. Posteriormente, em função

do aumento da produção de resíduos (vinculado ao aumento da população) o aterro passou a operar por empilhamento vertical resultando em uma elevação de até 35 metros. Na operação de acumulação vertical os resíduos são depositados em patamares, que foram homogêneos (espalhados), compactados e aterrados. As áreas ativas de recebimento de rejeitos eram mobilizadas ao longo do tempo, de forma que o antigo lixão foi progressivamente ampliado na direção noroeste. Nos anos 1990 houve o início de expansão do processo de aterramento para leste e nordeste (em direção ao limite do Parque Nacional de Brasília), contudo, por intervenção do Ministério Público do Distrito Federal e Territórios - MPDFT, uma faixa de 300 metros (área de tamponamento do Parque Nacional) foi considerada “embargada” para deposição de resíduos e o material já acumulado foi retirado ou parcialmente retirado.

A contaminação das águas subterrâneas não se dá diretamente pelos resíduos, mas por sua decomposição a partir da degradação da matéria orgânica em contato com as águas de recarga, o que gera o chorume. O volume de chorume varia em função do volume de resíduos enterrados, sendo que a operação em trincheiras rasas gera pequeno volume de chorume. Ao contrário, a operação no formato vertical que acumula volumes expressivos de lixo apresenta potencial para geração contínua de chorume por mais de 20 anos após o término de operação do lixão.

O chorume que é gerado no maciço de resíduos e principalmente em sua porção basal migra lateralmente com o próprio fluxo da água subterrânea por advecção. No caso do Lixão da Estrutural o fluxo se espalha para oeste / sudoeste (em direção ao córrego Cabeceira do Valo) e para leste / sudeste / nordeste (em direção à área de nascente do córrego do Acampamento).

Na base do maciço de resíduos o chorume apresenta elevada densidade podendo alcançar até 25.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (equivalente a 15,3 gramas de sais dissolvidos por litro). A concentração dos contaminantes diminui progressivamente quando se afasta do maciço de resíduos, chegando a 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nas margens da poligonal do lixão e reduzindo para valores da ordem 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou menor a distância de alguns quilômetros da área do lixão. A diminuição da concentração se dá por três processos: **i)** diluição por misturas com a água do aquífero (que apresenta excelente qualidade natural); **ii)** diluição por misturas com a água de recarga (águas de chuva que anualmente se infiltram e alcança a zona saturada do aquífero) e **iii)** atenuação natural pela interação do contaminante com a porção sólida do aquífero (argilas, argilominerais, óxidos, hidróxidos e grãos minerais residuais).

Em função da natureza dos materiais em subsuperfície o processo de atenuação natural é maior em direção ao Parque Nacional de Brasília, pois o aquífero é composto por materiais mais argilosos que têm maior capacidade de retenção de cargas contaminantes. O menor gradiente hidráulico em direção ao Parque Nacional de Brasília também é um fator importante para a

contenção da migração da pluma de contaminação para leste / sudeste. Por outro lado, dois fatores se somam para que a pluma se amplie em direção ao córrego Cabeceira do Valo: presença de areia média a grossa no arcabouço do aquífero e maior gradiente hidráulico. Este arranjo faz com que a pluma migre com uma velocidade de até dezenas de metros por ano.

Dentre os principais indicadores da contaminação se destacam: sódio, cloreto, amônia, Demanda Química de Oxigênio - DQO, cálcio e magnésio. O sódio e o cloreto são derivados do sal de cozinha liberados de restos de alimentos já processados que chegam ao aterro. A amônia representa o nitrogênio na forma reduzida que é oriundo de alimentos descartados e de outras fases orgânicos que são encaminhados ao lixão. O cálcio e o magnésio são derivados de restos de obras, na forma de fragmentos de concreto, revestimentos e outros resíduos compostos por argamassas e outros produtos ricos em cimento. A DQO elevada é própria do ambiente fortemente redutor que utiliza oxigênio nas diferentes reações que se processam no interior do maciço de resíduos, o qual pode ser visto como um grande reator químico em condições fortemente redutoras.

O cenário da contaminação das águas subterrâneas foi determinado por duas baterias de análises de amostras obtidas da rede de poços de monitoramento. O primeiro conjunto de resultados foi apresentado no diagnóstico ambiental da área (Produto 3). Os resultados do segundo levantamento, que foi realizado no dia 18 de setembro de 2020, estão apresentados nos mapas das Figuras 2 a 5 (e no Apêndice, Tabela 16).

Estes produtos cartográficos produzidos pela espacialização dos resultados analíticos em ambiente de sistema de informação geográfica mostram que o total de sais dissolvidos (TDS) é prioritariamente determinado pelos seguintes indicadores da contaminação: cloreto, sódio e amônia, além da demanda química de oxigênio. O padrão de distribuição espacial dos diferentes indicadores que se mantém de forma independente corrobora a definição prévia dos principais indicadores adotados. Em média estes quatro indicadores correspondem à 60% do TDS na zona de produção do chorume e alcança 40% nas zonas de distribuição da contaminação.

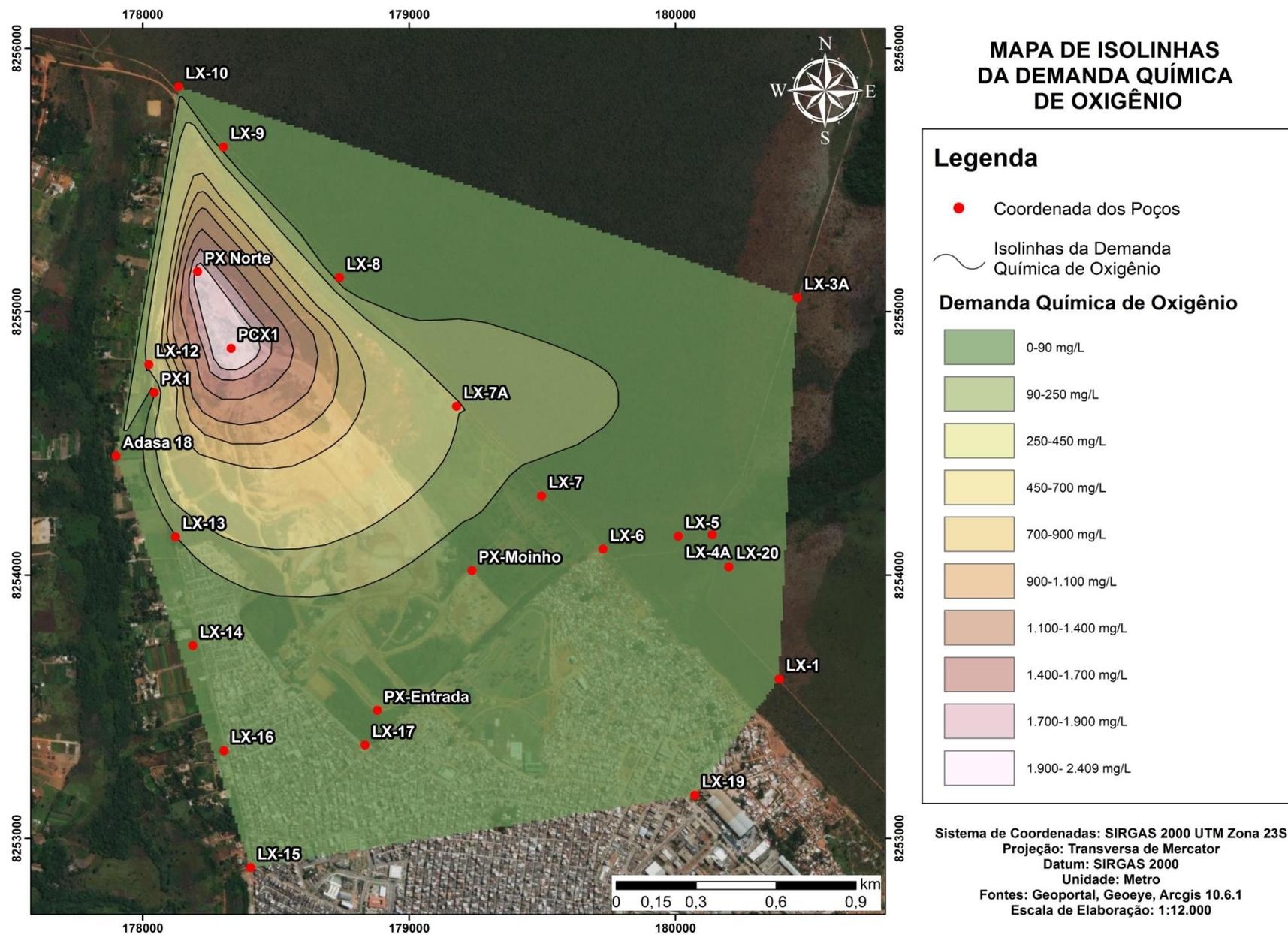


Figura 4 - Mapa de isoconcentração da Demanda Química de Oxigênio DQO na área do Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos (em mg/L). Sistema de coordenadas plana SIRGAS 2000 Zona 23. Imagem base obtida do Sistema *Google Earth*, de maio de 2020.

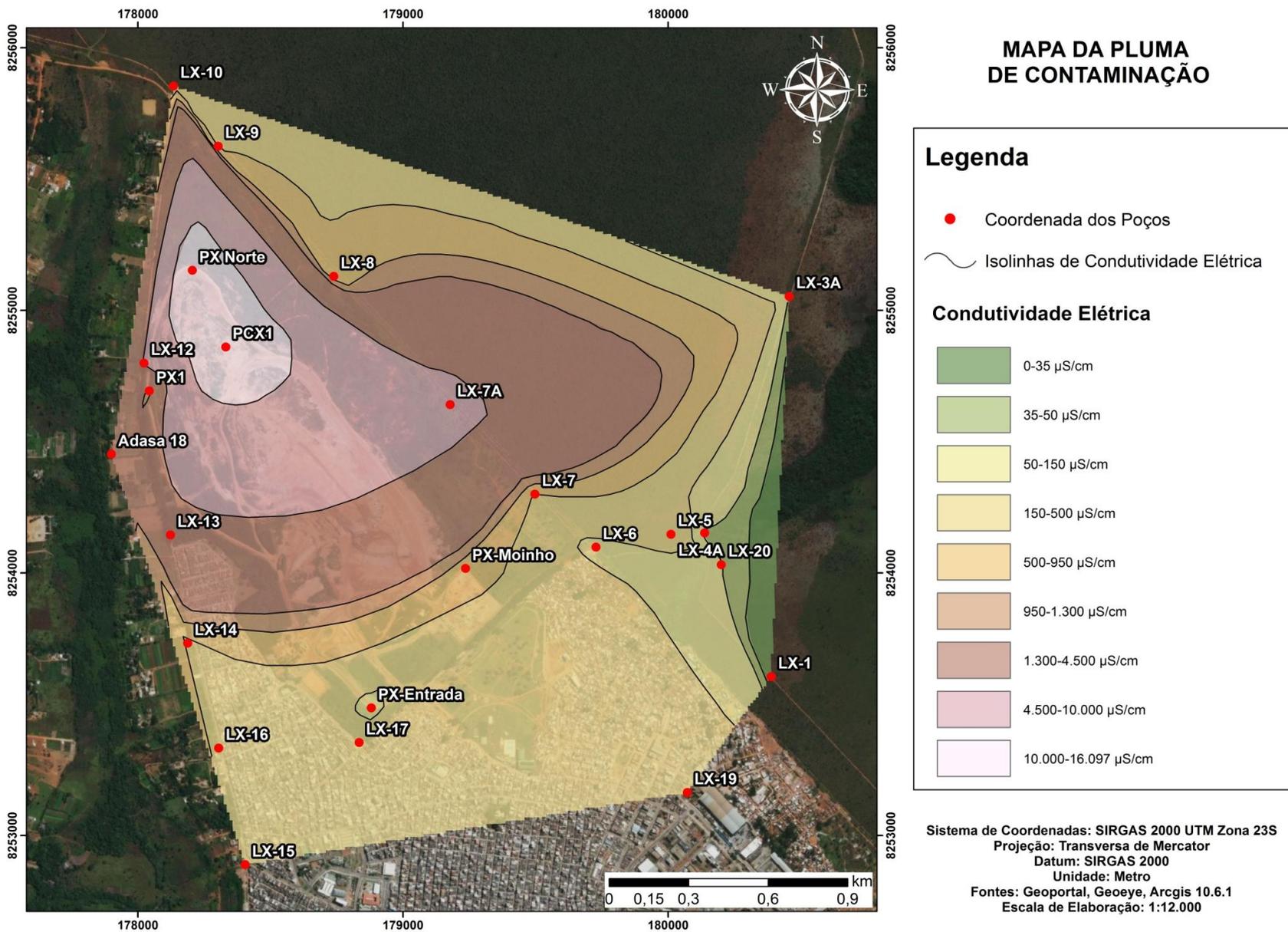


Figura 5 - Mapa da pluma de contaminação das águas subterrâneas no Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos, com base na condutividade elétrica das águas em $\mu\text{S/cm}$. Sistema de coordenadas plana SIRGAS 2000 Zona 23. Imagem base obtida do Sistema *Google Earth*, de maio de 2020.

3.2 Degradação dos Solos

A degradação dos solos na região do antigo Lixão da Estrutural, atual Unidade de Recebimento de Entulhos se dá por diferentes processos: acumulação e aterramento de resíduos (nas áreas de deposição de lixo), remoção dos horizontes superficiais (principalmente na área embargada), plantação de produtos hortigranjeiros (nas chácaras situadas na margem esquerda do Córrego Cabeceira do Valo), invasões urbanas (na área da ocupação de Santa Luzia) e impermeabilização/compactação dos horizontes superficiais (na área urbana consolidada da cidade Estrutural).

As diferentes formas de uso e ocupação dos solos na área do lixão e vizinhanças acarretam em dois tipos de problemas: potencial contaminação e redução da infiltração das águas de recarga dos aquíferos. A contaminação é potencialmente gerada pelos próprios resíduos sólidos, pelos efluentes da ocupação Santa Luzia e pelos agroquímicos aplicados na agricultura intensiva. A redução da recarga é comprovada pelo aumento de escoamento superficial observado na área urbana, principalmente após eventos de precipitação considerados anômalos.

Os trabalhos de diagnóstico foram específicos para a determinação de metais de transição dos horizontes superficiais dos solos, contudo, não foram observados teores expressivos deste tipo de contaminante. A conclusão a respeito dos baixos teores de metais nos solos foi de que a própria natureza dos resíduos não representa uma fonte anômala de metais, por se tratar de resíduos eminentemente urbanos.

O modelo urbano da Cidade Estrutural, horizontal, de elevada densidade, sem a presença de áreas verdes com elevadas taxas de impermeabilização, causa maior problema ambiental que a própria presença de resíduos na região. Esta questão resulta na diminuição da recarga natural dos aquíferos.

A área embargada entre o Lixão e o Parque Nacional de Brasília constitui uma ampla faixa que se apresenta fortemente degradada em função da abertura de trincheiras (de até 5 metros de profundidade), acúmulo de resíduos e sua posterior remoção parcial. Nesta faixa a vegetação natural de cerrado foi substituída por espécies exóticas com destaque para Margaridão (*Tithonia diversifolia*); Leucena (*Leucaena leucocephala*) e Mamona (*Ricinus communis L.*). Além da remoção dos horizontes superficiais e substituição da vegetação natural, ainda há locais com restos de resíduos que não foram totalmente removidos.

3.3 Contaminação das Águas Superficiais

Com relação à degradação das águas superficiais apenas o Córrego Cabeceira do Valo já apresenta mudança de sua qualidade natural em decorrência da chegada da pluma de contaminação. Esta constatação é facilmente corroborada pelos dados de análises de águas

freáticas no Poço Adasa 18 (Poço Raso) e já havia sido determinada no trabalho de Del'Rey (2020) por dados de monitoramento.

O Córrego Cabeceira do Valo ainda apresenta qualidade das águas bastante satisfatória, uma vez que, recebe grande contribuição de descarga a partir dos aquíferos freáticos situados em sua margem direita. O escoamento de base destes aquíferos rasos é responsável pela diluição de parte da carga de chorume que entra pela vertente esquerda.

No diagnóstico ambiental da área, o Córrego Cabeceira do Valo foi classificado como da Classe 2 de enquadramento dos corpos d'água (suas águas podem ser utilizadas para recreação, pesca, irrigação de hortaliças e frutíferas, dessedentação de animais e, só após tratamento convencional, para abastecimento urbano). As outras duas drenagens superficiais que fluem a partir da área do Lixão: Córrego do Acampamento e Ribeirão Bananal não apresentam mudança de sua qualidade natural, sendo classificados na Classe Especial de enquadramento (classe mandatária em Unidades de Conservação de Proteção Integral, para preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas).

Os estudos de modelagem de fluxo (Produto 3 deste projeto) indicam que estas duas cabeceiras foram poupadas da contaminação por diferentes fatores convergentes: menor gradiente hidráulico (que limita a velocidade do fluxo), maior presença de materiais argilosos em subsuperfície (que tem maior poder de atenuação da carga contaminante), maior distância entre a área de geração do efluente e as nascentes (que permite maior tempo de depuração da carga contaminante) e melhores condições de recarga dos aquíferos freáticos (que amplia a diluição da contaminação por águas de chuva de excelente qualidade).

3.4 Poluição Atmosférica

A degradação da matéria orgânica sob condições fortemente redutoras a temperaturas que podem exceder 40°C resulta no desenvolvimento do processo de metanogênese, no qual o carbono orgânico total (COT) presente nos resíduos enterrados se transforma em metano (CH₄). Além do metano há também a produção de Dióxido de Carbono (CO₂) em situações com menor deficiência de oxigênio. Estes voláteis são os principais componentes que são eliminados para a atmosfera a partir da degradação química dos resíduos e são importantes gases de efeito estufa.

Além destes gases na área são produzidos outros contaminantes atmosféricos, incluindo particulados (derivados do trânsito de caminhões e máquinas em vias não pavimentadas e áreas não vegetadas), fumaça de queimadas (de resíduos e de cobertura vegetal) e gases de combustão (produzidos em escapamentos de motores de caminhões e máquinas). A contaminação atmosférica é mais crítica no período seco do ano em que a metanogênese é maior, as queimadas mais frequentes e os ventos mais fortes, favorecendo a produção de particulados.

A quantificação da poluição atmosférica não é possível uma vez que não há estações de monitoramento na região. Apenas foram realizadas algumas campanhas de medição de gases gerados no maciço de resíduos nas saídas dos drenos, resultando em cerca de 70% em volume de $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$.

Além dos trabalhos de medição de gases a partir dos drenos instalados no maciço de resíduos, ainda existem relatórios periódicos sobre a qualidade do ar a partir da instalação de equipamentos de amostragem de grandes volumes. A título de exemplo, cita-se o relatório de Valor Ambiental (2019) que traz os resultados de medições de 24 horas de amostragem de grande volume em um ponto no raio de influência do britador de blocos e agregados instalado na porção sul da Unidade de Recebimento de Entulhos. Os resultados mostram que no mês de agosto de 2019 (considerado um mês crítico com relação aos particulados atmosféricos) os valores de partículas totais em suspensão (PTS), variam de: $125,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com a unidade de britagem parada e $186,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ com a unidade em operação. Estes resultados mostram que, com relação aos particulados totais, a atmosfera na região ainda está dentro dos padrões que consideram o teor de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor máximo permitido para este parâmetro de qualidade do ar.

Atualmente, as medidas efetivamente aplicadas para minimizar a poluição atmosférica são: queima do metano na saída dos drenos de forma a se produzir $\text{CO}_2 +$ vapor de água (os quais apresentam menor impacto como gás de efeito estufa) e aspersão de água com auxílio de caminhões-pipa nas vias de maior trânsito de caminhões e máquinas (para retenção de particulados finos). Não há controle dos incêndios florestais que se iniciam nas áreas limítrofes, se adentrando na área do Lixão e inclusive migrando em direção ao Parque Nacional de Brasília.

4. SISTEMAS PILOTOS DE REMEDIAÇÃO E MITIGAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

4.1 Considerações Iniciais

Os sistemas pilotos e técnicas apresentadas neste produto devem se enquadrar nas seguintes diretrizes: ter baixo custo de implantação e de operação, simular soluções baseadas na natureza, corresponder a ações com ampla efetividade e ter mínimo impacto à população residente nas áreas adjacentes.

As propostas aqui apresentadas são baseadas em ABNT (2020) e seguem a NBR 16784-1 Reabilitação de Áreas Contaminadas - Plano de Intervenção, Parte 1: Procedimento de Elaboração, tendo as seguintes linhas guias:

Segundo ABNT (2020) “A elaboração de um plano de intervenção deve ser realizada de forma clara e concisa, dentro de uma abordagem sistemática de avaliação das melhores

alternativas de intervenção visando à reabilitação da área contaminada para uso pretendido, considerando a mitigação dos riscos à saúde humana e ao meio ambiente a níveis aceitáveis de risco bem como, quando possível, a extinção da exposição”.

As medidas de mitigação e remediação devem ser determinadas a partir da natureza dos contaminantes, das feições do meio, dos cenários de migração dos contaminantes, do risco existente à população, dos objetivos da reabilitação, do uso desejado para o local e da proteção dos serviços ambientais a serem protegidos e da sustentabilidade dos ecossistemas associados.

O plano de intervenção deve considerar as seguintes fases:

- i) Determinação dos objetivos da remediação mitigação** - no caso do presente estudo se pretende minimizar a migração da pluma de contaminação, diminuir a produção de chorume primário, minimizar os impactos da poluição atmosférica e recuperar as áreas com solos degradados;
- ii) Definição de ações a serem adotadas** - contenção da pluma de contaminação com uso de baterias de poços de bombeamento (com ou sem tratamento do efluente), estabilização de metais nos solos, revegetação de solos degradados e fitorremediação de solos eventualmente contaminados por metais de transição;
- iii) Desenvolvimento do modelo conceitual de intervenção** - este modelo deve ser baseado no modelo conceitual da contaminação e deve prever ações de mitigação / remediação para cada uma das questões evidenciadas nos estudos prévios (diagnóstico ambiental);
- iv) Seleção das técnicas a serem adotadas** - devem seguir as premissas das soluções baseadas na natureza, sendo também relevante o baixo custo dos métodos adotados;
- v) Análise de incertezas e restrições do plano** - na etapa final das avaliações, as limitações das técnicas sugeridas devem ser consideradas em termos de aplicabilidade para o caso específico em estudo e quanto aos custos envolvidos e viabilidade de expansão dos pilotos em grande escala.

Os objetivos do plano de remediação / mitigação foram definidos considerando a conclusão do diagnóstico ambiental e os riscos à saúde humana e foram organizados conforme a NBR 16209 (ABNT, 2013). Os seguintes objetivos foram considerados na proposição das ações de mitigação no presente estudo:

- i) Controle das fontes de contaminação com destaque para a pluma de chorume, solos degradados e gases de efeito estufa;**
- ii) Atingir os menores níveis possíveis de contaminação dos aquíferos freáticos, minimizar a contaminação do córrego Cabeceira do Valo e evitar a contaminação dos córregos Acampamento e Bananal;**
- iii) Minimizar os impactos ao Parque Nacional de Brasília a partir dos efluentes e contaminantes gerados na área do antigo Lixão e atual Unidade de Recebimento de Entulhos da Estrutural.**

Conforme ABNT (2020) a decisão sobre as medidas de intervenção a serem adotadas deve ter como base:

- i)** Redução das concentrações das substâncias químicas de interesse nos compartimentos do meio físico contaminados que oferecem risco à saúde humana, considerando a sua distribuição mapeada na etapa de investigação detalhada (a qual deve ser realizada conforme a ABNT, 2013). No caso específico do presente estudo o Diagnóstico Ambiental (Produto 3) representa este estudo detalhado, mesmo que em parte por suas especificidades não siga o mesmo roteiro da NBR 15515-3;
- ii)** Controle, mitigação e eventualmente eliminação da exposição em locais onde foram determinados teores acima dos definidos pelas normas e legislações (exemplo, teores de amônia e DQO nas águas subterrâneas);
- iii)** Contenção e controle da expansão das plumas de contaminação mapeadas na investigação detalhada.

Para se alcançar os objetivos propostos, o plano de intervenção considera técnicas de tratamento e contenção, medidas de engenharia, implantação de cinturão verde na área limítrofe do Parque Nacional de Brasília, além de contar com controle institucional de diferentes órgãos de controle (Secretaria do Meio Ambiente SEMA-GDF, Ministério Público do Distrito Federal e Territórios - MPDFT, Instituto Brasília Ambiental - IBRAM e Agência Distrital de Águas, Energia e Saneamento - ADASA) e deve contar com apoio executivo, principalmente do Serviço de Limpeza Urbana - SLU e empresas contratadas.

A principal premissa para a elaboração do plano de intervenção é garantir por meio de medidas de remediação, de engenharia, e/ou institucionais que seja possível a reabilitação da área para futuros usos. As premissas a serem consideradas incluem:

- i)** Não ampliação das unidades de exposição definidas nos mapas de contaminação dos diferentes compartimentos (água subterrânea, água superficial e solo degradado);
- ii)** Controlar, eliminar ou interromper a exposição dos ambientes subterrâneo e superficial aos agentes contaminantes;
- iii)** Considerar a viabilidade técnica e os aspectos econômicos e os condicionantes socioambientais;
- iv)** Considerar a capacitação técnica das partes envolvidas e o potencial colaborativo das diferentes instituições envolvidas na execução do plano de gerenciamento da área contaminada como um todo que inclui o antigo Lixão, a Unidade de Recebimento de Entulhos, a Cidade Estrutural e vizinhanças.

4.2 Fitorremediação de Solos Contaminados por Metais

Duas ações foram consideradas nos projetos de fitorremediação de metais nos solos em áreas adjacentes aos locais de deposição de resíduos nos quase 60 anos de operação do Lixão da Estrutural: **Subprojeto FT-1** comparação do conteúdo de metais presentes em plantas nativas e exóticas na área da Estrutural e no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília e **Subprojeto FT-2** plantio de espécies arbóreas nativas, incluindo: Mama-cadela (*Brosimum gaudichaudii*), Ipê roxo (*Handroanthus impetiginosus*), Angico (*Anadenanthera macrocarpa*), Pata-de-Vaca (*Bauhinia forficata*), Jatobá (*Hymenaea courbaril*), Fedegoso (*Senna macranthera*), Mulungu (*Erythrina verna*), Copaíba (*Copaifera langsdorffii*), Cedro (*Cedrus*) e Baru (*Dipteryx alata*) e exótica: Eucalipto (*Eucalyptus*) e de cultivo de ciclo curto: Sorgo (*Sorghum bicolor*) e Girassol (*Helianthus annuus*) em área adjacente ao lixão da Estrutural e verificação dos teores de metais acumulados na biomassa.

Subprojeto FT-1

No subprojeto FT-1 foram considerados quatro pontos de amostragens de 4 espécies nativas e quatro espécies exóticas, totalizando 64 pontos de amostragens (32 na área do Lixão e 32 no campus Darcy Ribeiro). A escolha da área do Campus da Universidade de Brasília para comparação foi feita, pois, se trata de uma área situada a mais de 12 km a oeste da área do Lixão da Estrutural, com o mesmo contexto geológico, pedológico e geomorfológico o que permite uma avaliação por comparação direta, em princípio, sem vieses em função dos principais parâmetros de meio físico.

As seguintes espécies exóticas foram consideradas: Eucalipto (*Eucalyptus*), Margaridão (*Tithonia diversifolia*); Leucena (*Leucaena leucocephala*) e Mamona (*Ricinus communis L.*); e dentre as espécies nativas foram escolhidas: Angico (*Anadenanthera macrocarpa*), Pequi (*Caryocar brasiliense*), Araticum (*Annona montana*) e Ipê roxo (*Handroanthus impetiginosus*). A escolha destas espécies foi baseada em dois critérios: abundância ou existência nas duas áreas de amostragem e conhecimento prévio de sua potencial capacidade de acumulação de metais. As amostras foram codificadas com a terminologia FO1 de 01 a 32 e FO2 de 01 a 32, sendo que FO1 representam as amostras obtidas na área do lixão e FO2 amostras obtidas no Campus da Universidade de Brasília.

As Tabelas 2 e 3 trazem as coordenadas de localização de cada planta cujas folhas foram amostradas diretamente de galhos mais baixos ou com auxílio de podão para o corte de galhos mais elevados, respectivamente na área do Lixão e adjacências e na área do Campus Universitário Darcy Ribeiro (Asa Norte de Brasília).

Amostra	Espécie	UTM Oeste	UTM Sul	Cota (m)
Amostragem na Área do Lixão da Estrutural				
Espécies Nativas				
FO1-01	Angico	179.381	8.254.320	1115
FO1-02	Angico	179.454	8.254.186	1110
FO1-03	Angico	179.246	8.254.129	1115
FO1-04	Angico	820.994	8.254.896	1128
FO1-05	Pequi	179.477	8.254.252	1109
FO1-06	Pequi	179.219	8.254.572	1118
FO1-07	Pequi	179.253	8.254.527	1121
FO1-08	Pequi	179.227	8.254.608	1119
FO1-09	Araticum	179.379	8.254.219	1112
FO1-10	Araticum	179.164	8.254.642	1117
FO1-11	Araticum	179.480	8.254.139	1119
FO1-12	Araticum	179.345	8.254.148	1117
FO1-13	Ipê	179.085	8.254.749	1130
FO1-14	Ipê	179.164	8.254.642	1117
FO1-15	Ipê	179.715	8.253.612	1125
FO1-16	Ipê	179.158	8.254.634	1121
Espécies Exóticas				
FO1-17	Eucalipto	178.891	8.253.380	1136
FO1-18	Eucalipto	820.994	8.254.896	1128
FO1-19	Eucalipto	821.311	8.253.997	1121
FO1-20	Eucalipto	821.076	8.255.585	1131
FO1-21	Leucena	178.891	8.253.380	1136
FO1-22	Leucena	179.175	8.253.964	1120
FO1-23	Leucena	821.455	8.254.019	1132
FO1-24	Leucena	821.012	8.254.912	1134
FO1-25	Margaridão	178.891	8.253.380	1136
FO1-26	Margaridão	179.175	8.253.964	1120
FO1-27	Margaridão	821.455	8.254.019	1132
FO1-28	Margaridão	821.012	8.254.912	1134
FO1-29	Mamona	178.891	8.253.380	1136
FO1-30	Mamona	179.175	8.253.964	1120
FO1-31	Mamona	821.455	8.254.019	1132
FO1-32	Mamona	821.012	8.254.912	1134

Tabela 2 - Localização dos espécimes vegetais amostrados na área de Lixão da estrutural.

Amostra	Espécie	UTM Oeste	UTM Sul	Cota (m)
Amostragem na Área do Campus Darcy Ribeiro (UnB)				
Espécies Nativas				
FO2-01	Angico	192.277	8.254.737	1038
FO2-02	Angico	192.378	8.253.321	1039
FO2-03	Angico	192.500	8.255.503	1030
FO2-04	Angico	192.548	8.254.715	1038
FO2-05	Pequi	194.153	8.259.668	1025
FO2-06	Pequi	191.896	8.255.483	1043
FO2-07	Pequi	193.600	8.254.992	1015
FO2-08	Pequi	193.781	8.254.779	1022
FO2-09	Araticum	194.305	8.259.661	1028
FO2-10	Araticum	193.781	8.254.779	1022
FO2-11	Araticum	192.373	8.255.941	1024
FO2-12	Araticum	192.732	8.253.865	1037
FO2-13	Ipê	191.690	8.256.120	1036
FO2-14	Ipê	192.372	8.254.666	1043
FO2-15	Ipê	192.924	8.254.995	1027
FO2-16	Ipê	192.118	8.255.783	1035
Espécies Exóticas				
FO2-17	Eucalipto	193.781	8.254.779	1022
FO2-18	Eucalipto	192.378	8.253.321	1039
FO2-19	Eucalipto	192.319	8.253.860	1050
FO2-20	Eucalipto	193.106	8.255.090	1013
FO2-21	Leucena	193.868	8.259.503	1015
FO2-22	Leucena	190.886	8.256.852	1022
FO2-23	Leucena	193.467	8.255.098	1015
FO2-24	Leucena	192.266	8.253.814	1051
FO2-25	Margaridão	193.868	8.259.503	1015
FO2-26	Margaridão	193.202	8.254.932	1020
FO2-27	Margaridão	192.677	8.255.059	1023
FO2-28	Margaridão	-	-	-
FO2-29	Mamona	194.075	8.259.620	1016
FO2-30	Mamona	191.596	8.256.540	1034
FO2-31	Mamona	191.892	8.254.620	1050
FO2-32	Mamona	192.361	8.253.658	1040

Tabela 3 - Localização dos espécimes vegetais amostrados na área do Campus Universitário Darcy Ribeiro e adjacências.

Este procedimento de amostragem de plantas já desenvolvidas objetivou uma avaliação da capacidade de acumulação de metais nos tecidos vegetais sem a necessidade de se plantar e aguardar o tempo necessário para que fosse possível amostrar a massa foliar. Também se deve ter em mente que muitos dos espécimes amostrados desenvolvem-se diretamente sobre a área de aterro de resíduos, e outras estão dispostas em sua faixa marginal, isto é, representam áreas submetidas à ação de potencial degradação pelo lixão.

A Tabela 4 traz os resultados das análises dos metais selecionados nas plantas nativas e exóticas nas duas áreas de amostragens.

Estes resultados mostram que não há variação estatística entre as concentrações dos metais em plantas coletadas na área do lixão e adjacências e na área do Campus Universitário Darcy Ribeiro. Teores maiores podem ser observados de forma aleatória em amostras de plantas situadas no Lixão da Estrutural e na Asa Norte de Brasília, o que comprova que os metais têm origem geogênica e pedogênica sem vínculo com acumulação anômala em função da operação do lixão. Esta conclusão já havia sido relatada durante os estudos de diagnóstico ambiental (Produto 3) e foi vinculada à origem dos resíduos acumulados: exclusivamente oriundos de fontes domésticas, sem contribuição de indústrias, mineração ou outras origens mais críticas que disponibilizam maiores teores de metais.

De qualquer forma os resultados podem ser aplicados para futuros estudos de fitorremediação de solos contaminados por metais, pois os dados analíticos mostram que determinadas plantas acumulam valores anômalos de determinados metais, isso se considerando os valores médios e modais observados (eliminando-se os *outliers*).

Das plantas testadas o Eucalipto (*Eucalyptus*) é o principal acumulador de sódio, uma vez que, enquanto os demais tipos vegetacionais acumulam valores da ordem de no máximo poucas centenas de mg/kg de massa foliar, o Eucalipto (*Eucalyptus*) alcança valores entre 1.609 e 18.958 mg/kg (com média de 8.812 mg/kg).

O cobre ocorre com teores na ordem de grandeza da unidade em todas as plantas, com exceção do Margaridão (*Tithonia diversifolia*) em que varia com teores de 5,66 até 15,42 com média de 10,85 mg/kg. Este teor médio representa mais que 100% da média dos demais tipos de vegetação e indica que esta espécie de planta pode ser potencialmente aplicada para fitorremediação de solos contaminados por cobre (principalmente para casos em que os teores nos solos forem anômalos).

Embora os teores sejam bastante variáveis, o Margaridão (*Tithonia diversifolia*) também se destaca como um acumulador de zinco. Neste caso, os teores variam desde menores que o limite de detecção (em uma amostra do lixão) até o valor máximo de 132,11 mg/kg com média de 72 mg/kg de massa foliar. Este valor médio é maior que todas as demais plantas, com destaque para Eucalipto (*Eucalyptus*) e Angico (*Anadenanthera macrocarpa*), cujos valores são menores que o limite de quantificação do método analítico para todas as amostras. Leucena (*Leucaena leucocephala*) e Ipê apresentam valores médio da ordem de 25 mg/kg e as demais plantas valores muito baixos.

Planta	Amostra	Ca	Mg	K	Na	Cu	Fe	Zn	Al	Pb	Cd	As	Hg
		g/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Angico	FO1 - 01	21,28	1,71	4,14	265,13	2,38	141,58	< 0,01	433	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Angico	FO2 - 01	16,58	1,58	5,21	226,29	4,44	162,05	< 0,01	3.853	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Angico	FO1 - 02	23,25	1,73	4,11	205,49	2,75	145,95	< 0,01	10.315	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Angico	FO2 - 02	9,89	0,94	4,47	363,92	3,65	261,38	< 0,01	12.252	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Angico	FO1 - 03	4,05	0,80	5,66	223,95	4,01	175,72	< 0,01	8.069	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Angico	FO2 - 03	24,54	0,66	5,04	367,19	3,62	124,39	< 0,01	6.458	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Angico	FO1 - 04	11,68	2,02	7,17	528,16	6,37	298,27	< 0,01	18.551	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Angico	FO2 - 04	16,66	0,77	5,12	206,18	7,14	148,41	< 0,01	7.194	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO1 - 05	8,01	0,89	4,52	100,87	3,42	493,65	17,94	1326	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO2 - 05	10,18	1,08	3,06	73,32	2,14	334,95	12,1	16.700	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO1 - 06	5,21	1,18	4,12	204,69	2,75	582,44	12,55	28.304	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO2 - 06	9,06	1,54	4,53	107,58	3,51	527,64	15,35	25.432	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO1 - 07	7,63	0,56	3,37	126,09	2,51	589,38	9,61	39.379	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO2 - 07	3,71	0,64	4,00	117,87	2,25	530,63	11,89	24.959	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO1 - 08	3,11	0,92	2,96	142,58	3,38	867,86	19,52	39.990	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pequi	FO2 - 08	4,70	0,48	2,67	82,56	3,16	702,56	12,85	44.595	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO1 - 09	8,32	0,48	6,00	170,42	6,38	253,68	16,54	690	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO2 - 09	3,79	0,58	6,98	66,82	5,07	81,44	14,04	3.285	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO1 - 10	3,88	1,09	7,00	82,20	9,44	187,71	20,65	13.438	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO2 - 10	7,22	1,44	4,54	91,43	3,23	234,17	19,77	12.321	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO1 - 11	9,39	0,70	4,93	90,94	5,71	208,01	14,34	11.615	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO2 - 11	5,54	2,07	5,24	72,72	6,31	154,36	20,73	12.184	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO1 - 12	14,04	2,09	2,97	107,95	3,33	210,02	29,59	12.830	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Araticum	FO2 - 12	7,81	0,78	4,13	156,02	4,04	110,15	14	4.342	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO1 - 13	15,04	1,93	6,88	168,80	8,74	144,29	36,15	519	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO2 - 13	10,88	1,11	5,67	102,87	5,74	139,44	19,75	6.209	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO1 - 14	13,09	0,97	4,32	240,42	4,80	439,90	28,52	207.72	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO2 - 14	14,88	2,14	4,01	261,73	6,11	131,85	11,32	5.866	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO1 - 15	12,47	2,68	4,60	371,04	6,92	436,48	63,79	31.337	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO2 - 15	19,00	1,49	7,74	153,29	5,59	182,08	16,92	9.512	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO1 - 16	14,43	1,41	5,91	177,53	3,81	116,63	21,18	8.103	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Ipê	FO2 - 16	23,51	2,01	3,52	67,30	5,24	109,89	13,43	6.011	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Eucalipto	FO1 - 17	5,52	1,31	8,35	18.958,89	2,99	210,62	< 0,01	719	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eucalipto	FO2 - 17	3,88	1,19	5,80	4.053,98	3,82	295,37	< 0,01	5.407	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eucalipto	FO1 - 18	5,67	1,19	6,91	8.642,51	2,58	186,93	< 0,01	10.168	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eucalipto	FO2 - 18	5,88	0,75	6,02	10.899,35	3,34	107,81	< 0,01	4387	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eucalipto	FO1 - 19	6,43	1,17	13,08	8.451,06	5,48	116,10	< 0,01	12.533	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eucalipto	FO2 - 19	4,73	1,67	6,02	7.291,58	5,12	106,49	< 0,01	3.734	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eucalipto	FO1 - 20	11,96	2,11	9,09	10.593,48	5,64	130,05	< 0,01	8.292	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eucalipto	FO2 - 20	12,07	2,41	4,34	1.609,79	2,31	86,76	< 0,01	6.526	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO1 - 21	9,54	1,83	8,66	170,62	4,86	143,38	20,35	137	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO2 - 21	9,28	1,82	12,96	193,25	8,61	464,91	21,35	22.261	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO1 - 22	9,20	1,82	12,35	175,23	6,67	368,54	22,35	23.555	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO2 - 22	17,21	2,34	12,09	176,04	5,27	290,43	23,35	3750	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO1 - 23	9,94	1,91	11,37	87,58	6,76	303,63	24,35	15.672	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO2 - 23	6,97	1,06	8,00	42,37	3,05	105,36	25,35	10.012	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO1 - 24	6,97	1,54	12,13	218,33	9,54	230,05	26,35	11.013	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Leucena	FO2 - 24	6,22	1,06	5,98	146,63	2,37	48,96	27,35	1.914	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO1 - 25	16,98	2,91	21,60	266,52	8,12	636,01	< 0,01	1.983	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO2 - 25	9,09	1,18	14,93	118,70	7,04	251,80	87,71	8.973	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO1 - 26	15,67	2,47	22,75	117,21	12,71	354,49	132,11	26.920	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO2 - 26	11,89	2,63	14,77	111,71	5,66	135,25	77,85	5.744	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO1 - 27	17,59	2,37	23,44	163,32	14,67	209,96	79,1	15.984	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO2 - 27	13,20	1,83	24,87	150,41	11,62	574,59	58,83	30.305	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO1 - 28	26,32	2,70	20,22	102,25	15,42	313,00	83,18	24.983	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Margaridão	FO2 - 28	14,24	2,74	20,64	109,20	11,61	301,10	58,17	11.639	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO1 - 29	15,24	2,11	15,47	471,59	5,10	217,71	1	542	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO2 - 29	11,02	1,62	18,85	333,27	7,01	220,85	2,88	13.247	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO1 - 30	9,67	1,63	14,60	270,34	6,80	162,30	7,71	4.502	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO2 - 30	14,77	1,98	18,39	323,71	6,08	261,30	0,19	10.131	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO1 - 31	13,11	1,39	10,19	143,55	8,22	299,97	32,11	3.980	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO2 - 31	11,75	1,27	11,13	144,84	7,22	96,97	32,32	2.213	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO1 - 32	9,53	1,87	17,10	312,10	5,95	117,22	5,24	5.552	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mamona	FO2 - 32	10,84	1,47	8,10	119,07	9,04	87,96	23,91	3.657	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 4 - Resultados das análises químicas de massa foliar de plantas nativas e exóticas amostradas na área do Lixão da Estrutural e no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

O ferro e o alumínio ocorrem de forma expressiva em todas as plantas analisadas, entretanto, os teores são anômalos no Margaridão (*Tithonia diversifolia*) dentre as espécies exóticas e no Pequi (*Caryocar brasiliense*) dentre as espécies nativas. No Margaridão (*Tithonia diversifolia*) o ferro ocorre com teor médio de 347 mg/kg (com variação de 15 a 636) e o alumínio de 15.816 mg/kg (com variação de 1.983 a 30.305). No caso do Pequi (*Caryocar brasiliense*) os teores médios são, respectivamente de, 578 e 27.585 mg/kg para o Fe e o Al

Estes resultados corroboram com os resultados das análises que solos que mostram que não há contaminação significativa dos solos na área do lixão e adjacências, em função da presença do lixão e da atual operação da Unidade de Recebimento de Entulhos na região.

Subprojeto FT-2

No subprojeto FT-2 foram realizados dos tipos de plantios visando à verificação da capacidade de retenção de metais pelas diferentes fases vegetacionais: i) plantas arbóreas, plantadas a partir de mudas e ii) plantas de ciclo curto Sorgo (*Sorghum bicolor*) e Girassol (*Helianthus annuus*) plantadas a partir de sementes. A localização das áreas de plantio está destacada na Figura 6.

As plantas de espécies arbóreas ainda estão em fase de desenvolvimento e ainda não foram amostradas para a verificação de sua capacidade de acumulação de metais. O sorgo (*Sorghum bicolor*) e girassol tiveram seu ciclo de vida concluído, e foram amostradas no final do período seco e sua massa foliar em base seca foi encaminhada ao laboratório Soloquímica (Tabela 5). Os resultados estão apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente para Girassol (*Helianthus annuus*) e Sorgo (*Sorghum bicolor*).

Amostra	Espécie	Coordenada UTM		Elevação
GS1	Girassol	192.378	8.253.321	1039
GS2	Girassol	192.500	8.255.503	1030
GS3	Girassol	192.548	8.254.715	1038
GS4	Girassol	194.153	8.259.668	1025
SG1	Sorgo	191.896	8.255.483	1043
SG2	Sorgo	193.600	8.254.992	1015
SG3	Sorgo	193.781	8.254.779	1022
SG4	Sorgo	194.305	8.259.661	1028
SG5	Sorgo	193.781	8.254.779	1022

Tabela 5 - Localização dos pontos de amostragem das plantas de ciclo curto.

Os dados mostram que o Girassol (*Helianthus annuus*) tem maior poder de acumulação dos elementos do complexo sortivo, incluindo cálcio, magnésio, sódio e potássio, além de ferro e alumínio. Com relação aos metais de transição, como os teores nos solos são baixos não foi encontrado qualquer valor acima do limite de quantificação no método analítico que neste caso é de 0,001 mg/kg de solo.



A



B

Figura 6 - A - Situação da área do plantio no âmbito da poligonal do Lixão da Estrutural. **B** - Poligonais dos perímetros plantados. Em vermelho, limite do plantio de espécies arbóreas e arbustivas nativas do cerrado e mata galeria. Em amarelo, área do plantio de eucalipto. Em azul área de plantio de Sorgo (*Sorghum bicolor*). Em cor laranja, plantio de Girassol (*Helianthus annuus*). Imagem do *Google Earth* de 29 de maio de 2020.

Identificação	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
Extrator	KCl	KCl	KCl	Mehlich I	KCl	Mehlich I						
Unidades	cmol/dm ³	mg/kg										
GS1	24,76	4,39	39,54	314,10	14,22	458,12	43,29	2.398	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
GS2	37,58	5,20	37,77	425,70	12,93	589,43	35,00	34.848	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
GS3	40,72	4,64	44,97	561,22	18,01	619,52	29,38	57.304	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
GS4	41,02	7,14	32,91	356,37	21,53	674,22	37,13	56.601	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Média	36,02	5,34	38,79	414,34	16,67	585,32	36,2	37.787	-	-	-	-

Tabela 6 - Resultados das análises de massa foliar de girassol após seu ciclo de desenvolvimento.

Identificação	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
Extrator	KCl	KCl	KCl	Mehlich I	KCl	Mehlich I						
Unidades	cmol/dm ³	mg/kg										
SG1	5,65	1,66	18,30	301,86	3,54	191,01	15,29	2.934	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
SG2	5,49	1,69	20,69	262,62	3,40	229,13	15,14	6.754	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
SG3	5,66	2,11	20,29	285,65	3,23	168,80	14,20	514	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
SG4	5,66	3,16	22,72	-	3,60	270,67	14,51	11.279	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
SG5	0,78	1,37	4,90	114,34	3,83	86,05	23,27	6.294	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Média	4,64	1,99	17,38	241,11	3,52	189,13	16,48	5.555	-	-	-	-

Tabela 7 - Resultados das análises dos teores de metais em massa foliar e grãos de sorgo (*Sorghum bicolor*), após crescimento e secamento.

O Sorgo (*Sorghum bicolor*) apresenta menores teores de todos os metais, sendo que os valores médios com relação ao conteúdo das mesmas espécies químicas analisadas para o Girassol (*Helianthus annuus*) as seguintes: potássio 7,36%; cálcio 27,26%; magnésio 44,8%; sódio 58,19%; alumínio 21,11%; ferro 32,32%; cobre 45,52% e zinco 14,7%.

4.3 Estabilização de Metais no Solo

Para Moreira *et al.* (2010) os resíduos sólidos urbanos possivelmente podem servir como fonte de metais pesados que afetam principalmente os solos e as águas subterrâneas incluindo cádmio, cobre, chumbo, zinco, cobalto, crômio e arsênio. Contudo, Costa (2005) aponta que o problema reside não só no fato da maior concentração total destes metais pesados no solo, mas também na sua biodisponibilidade. Segundo Guedes (2008), o metal na forma solúvel está na forma iônica ou de complexos orgânicos e é facilmente absorvido pelas plantas ou é lixiviado, podendo atingir as águas subterrâneas. Na forma trocável, o metal ligado eletrostaticamente em sítios de adsorção carregados negativamente na matéria orgânica ou em minerais, pode ser facilmente trocado por íons presentes na solução do solo, sendo então biodisponibilizados.

Mesmo após a mudança para o novo aterro em Samambaia, ainda existe o passivo ambiental e os danos provenientes de anos de acumulação de resíduos na região são visíveis. Este trabalho tem o objetivo de determinar os limites das áreas afetadas, os impactos ambientais aos solos, entender sua dinâmica e propor soluções. Para tanto, uma área de estudo piloto de 1,9 ha de extensão foi selecionada nos limites do terreno do Lixão da Estrutural para o experimento de estabilização da contaminação por metais no solo (Figura 7).

Materiais e Métodos

O experimento desenvolvido objetivou a estabilização de metais biodisponíveis nos solos a partir da elevação do pH nos horizontes superficiais de forma a funcionar como uma medida de mitigação da contaminação eventualmente incorporada no perfil de solos pela destinação de resíduos sólidos urbanos na área.

Este experimento foi dividido em de três etapas: amostragem prévia dos solos na poligonal piloto, calagem do solo com uso de pó de dolomito, e amostragem posterior. Para a coleta dos solos foram utilizados enxadão, cavadeira articulada (boca de lobo), trado manual, trena, sacos plásticos, fita adesiva, pincel permanente e câmera fotográfica. Cada ponto foi georreferenciado com auxílio de GPS de mão. Após a tradagem as amostras eram acondicionadas nos sacos plásticos, identificadas e registravam-se os dados do ponto e amostra.

de pó de dolomito foram incorporadas ao solo na parcela experimental.

Em 13 de maio de 2020, com o intuito de simular uma precipitação, foram adicionados aproximadamente 40 litros de água junto a cada uma das demarcações (Figura 8B). Esta ação foi necessária para compensar o encerramento do período chuvoso, de forma que o aumento da umidade poderia auxiliar na incorporação do dolomito, no aumento do pH do solo e consequente otimização das reações químicas em subsuperfície.



Figura 8 - A: Sítio experimental arado e gradeado após a primeira etapa de amostragem. **B:** Local com incorporação do pó de dolomito e irrigação localizada com 40 litros de água para potencializar a incorporação do carbonato de cálcio e magnésio ao perfil de solo.

A segunda série de amostragem aconteceu no dia 11 de junho de 2020, da mesma maneira que a primeira: Amostra A - 0 a 20 cm, e Amostra B - 40 a 60 cm de profundidade. A tradagem foi feita preferencialmente no local onde foi despejada a água (Figura 9). Prontamente foram encaminhadas ao laboratório.



Figura 9 - Tradagem manual durante amostragem do solo nas proximidades dos locais demarcados em que a dosagem de dolomito foi ampliada e onde foi realizada a irrigação localizada.

As análises das duas séries de amostras de solo e do dolomito utilizado foram feitas no laboratório Soloquímica Análises de solos, em Brasília. Para se avaliar a efetividade do controle do pH na estabilização dos metais trocáveis, os procedimentos analíticos foram realizados com a mesma metodologia de estudos de fertilidade de solos (Silva *et al.*, 1998) nos dois conjuntos de análises.

A preparação das amostras se deu com o destorroamento de forma manual, secagem em estufa (40°C), separação das frações do solo por tamisação e homogeneização da fração menor que 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA), identificação e reserva da TFSA.

A medição do pH em água realizou-se através do potenciômetro com a imersão do eletrodo na porção em suspensão da solução de solo (1:2,5 - 10 cm³ de TFSA solubilizados em 25 ml de água destilada/deionizada). Já a do pH em KCl se deu depois do processo de extração de 10 cm³ de TFSA em 100 ml de solução de KCl 1M (agitados por 5 minutos em agitador horizontal circular e decantada durante uma noite, desfeitos os montículos de fundo no dia seguinte).

Após as leituras do pH houve as extrações para análises com uso de dois procedimentos: solução de KCl e método de extração Mehlich I. A extração pelo método Mehlich I desenvolve-se com 10 cm³ de TFSA em 100 ml de solução extratora duplo-ácida (HCl 0,05M + H₂SO₄ 0,0125M). Em seguida a solução deve ser agitada por 5 minutos em agitador horizontal circular e decantada durante uma noite, e por fim, desfeitos os montículos de fundo no dia seguinte.

As extrações por solução de KCl foram feitas para K, Ca, Mg, e Al. As extrações pelo método Mehlich I foram feitas para Na, Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, As e Hg. Feitas as extrações, as amostras são levadas ao Espectrofotômetro de Absorção Atômica para a leitura dos teores. Tais elementos foram selecionados para análise, pois são os principais indicadores de eventual contaminação dos solos pelo uso contínuo da área para disposição de resíduos sólidos urbanos.

Síntese sobre o Meio Físico da Área

A geologia da área Distrito Federal inclui quatro grandes conjuntos litoestratigráficos incluindo os grupos Paranoá e Canastra de idade mesoproterozoica e os grupos Bambuí e Araxá de idade neoproterozoica (Campos *et al.* 2012). Na área de estudo ocorrem sob os solos espessos rochas atribuídas às formações Ribeirão do Torto e Ribeirão Piçarrão do Grupo Paranoá, respectivamente representadas por ardósias e por metassiltitos com lentes e camadas de quartzitos grossos no topo (Campos *et al.* 2013).

A Região Administrativa da Estrutural situa-se majoritariamente sobre Latossolos. O mapa de solos do Distrito Federal (Reatto *et al.* 2004) mostra que na maior proporção da área ocorrem Latossolos Vermelhos com presença de Latossolos Vermelho-Amarelos em menor proporção, e de Gleissolos Háplicos em estreitas faixas no vale do córrego Cabeceira do Valo e Córrego do Acampamento. Vale ressaltar que por se tratar de uma área há anos antropizada, os solos no Lixão e imediações comumente incluem aterros, ou apresentam a retirada de horizontes superficiais, ou ainda apresentam porções alóctones pedogenizadas.

O compartimento geomorfológico em que se localiza a área de estudo é a Região de Dissecação Intermediária ou Plano Intermediário, na Depressão do Paranoá (Novaes-Pinto, 1994; Martins & Baptista, 1998, Campos, 2012). O padrão de relevo local e regional é predominantemente plano a suave ondulado, com variação de altitude entre 1.090 e 1.150 metros (incluindo a elevação artificial representada pela pilha de resíduos).

O clima do Distrito Federal, segundo a classificação de Köppen, é Tropical, em que são nítidas duas estações, a primavera/verão representando um período chuvoso, e o outono/inverno que marca o período seco (CODEPLAN, 2017). A temperatura média é de 21,1°C, e a média anual de pluviosidade é de 1500 mm (*in* CLIMATE-DATA.ORG).

Resultados

Análises da mineralogia do solo feita por Difração de Raios-X foram realizadas nas amostras ISO-01A, ISO-01B, ISO-13A, e ISO-13B da primeira série de amostragem. Os mesmos minerais foram caracterizados em todas as amostras analisadas (Tabela 8).

Mineral	Fórmula Química
Quartzo	SiO ₂
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Gibbsita	Al(OH) ₃
Goethita	FeO(OH)
Hematita	Fe ₂ O ₃
Anatásio	TiO ₂
Rutilo	TiO ₂

Tabela 8 - Resultados da Difractometria de Raios-X.

Os difratogramas das quatro amostras apresentaram os mesmos picos, portanto os mesmos minerais. Foram plotados os dois tipos de análise em cada difratograma, incluindo a amostra total e a amostra da fração argilosa (Figura 10).

O quartzo, anatásio e rutilo são considerados minerais resistentes, sendo originados do material de partida (metassedimentos do Grupo Paranoá). A caulinita, gibbsita, hematita e goethita são minerais derivados dos processos pedogenéticos, sendo as principais fases em que a eventual contaminação por metais deverá ficar retida.

Em ambas as etapas de amostragem foram analisados os seguintes metais: potássio, cálcio, magnésio, sódio, alumínio, ferro, cobre, zinco, chumbo, cádmio, arsênio e mercúrio. A Tabela 9 traz os resultados analíticos da primeira campanha de amostragem e a Tabela 10 os resultados da segunda campanha.

Os teores obtidos da análise do dolomito são os seguintes: K - 0,02 cmol/dm³; Ca - 2,6 cmol/dm³; Mg - 0,8 cmol/dm³; Na - 0,01 cmol/dm³; Al - zero; Fe - 45,1 mg/Kg; Cu - 0,9 mg/Kg; Zn - 0,1 mg/Kg; Pb - 0,1 mg/Kg; Cd - < 0,01 mg/Kg; As - < 0,01 mg/Kg e Hg - < 0,01 mg/Kg.

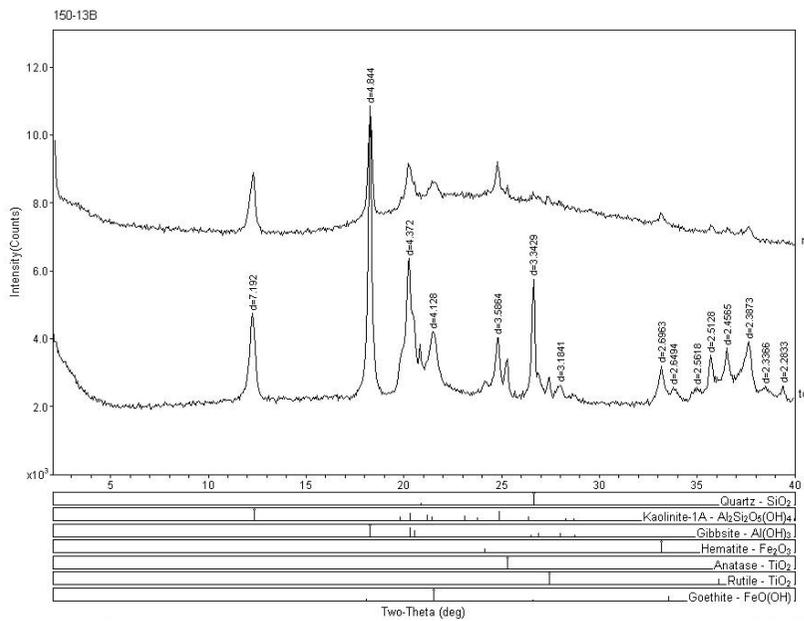
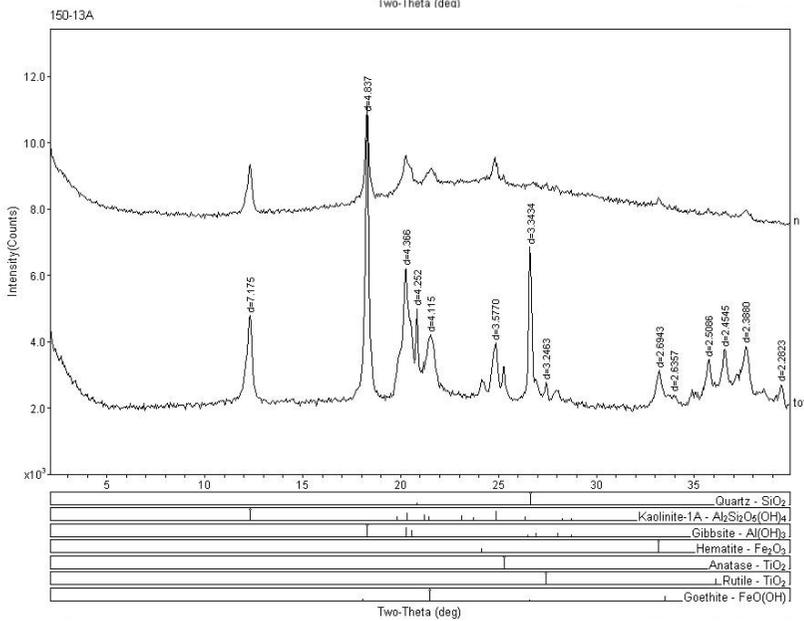
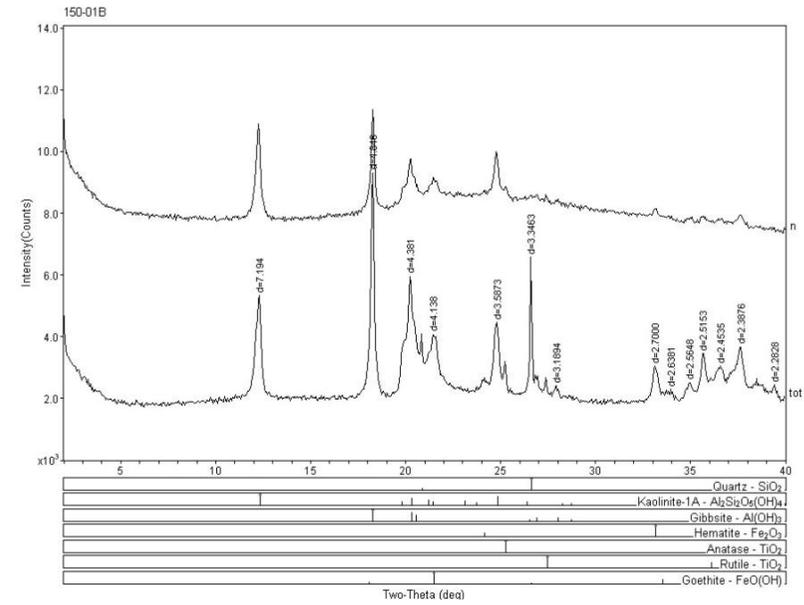
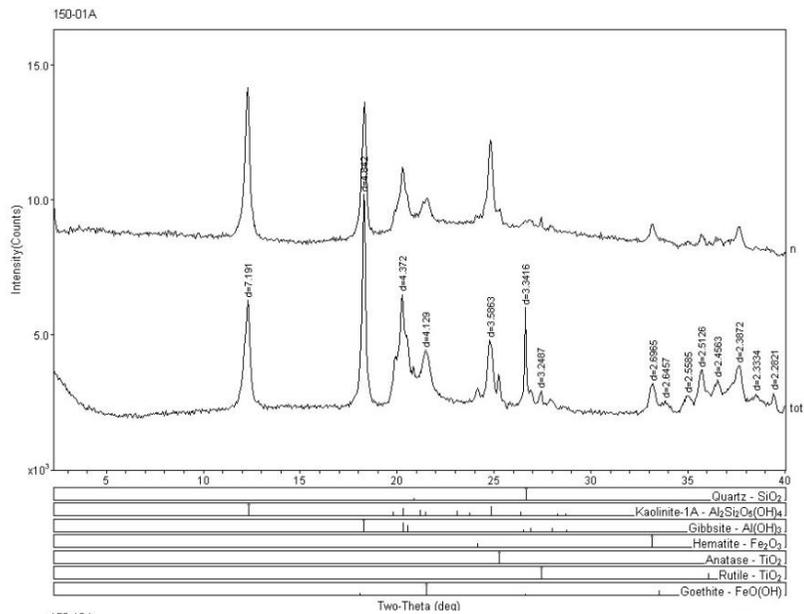


Figura 10 - Difratomogramas de Raios X das amostras 150-01A, 150-01B, 150-13A, e 150-13B. tot = Total - pó prensado sobre a lâmina; e n = Normal - fração argila separada seca ao ar e orientada sobre a lâmina.

Identificação	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
Extrator	KCl	KCl	KCl	Mehlich I	KCl	Mehlich I						
Unidades	cmol/dm ³	mg/kg										
ISO - 1A	0,05	2,7	0,6	0,01	0	57,9	0,5	0,5	0,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 1B	0,04	0,9	0,1	0,01	0	103,7	0,5	0,1	0,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 2A	0,04	2,9	0,5	0,01	0	62,4	0,4	0,3	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 2B	0,06	0,7	0,1	0,01	0	97,9	0,4	0,01	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 3A	0,03	3,3	0,7	0,01	0	75,5	0,5	1,8	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 3B	0,02	0,6	0	0,01	0,1	71,7	0,3	0,01	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 4A	0,04	4,8	0,4	0,02	0	127,4	0,9	3,6	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 4B	0,02	0,8	0	0,01	0,1	117,5	0,4	0,1	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 5A	0,04	2,1	0,3	0,01	0	79,5	0,4	0,3	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 5B	0,02	0,8	0	0,01	0	102,9	0,4	0,1	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 6A	0,07	2,9	0,5	0,01	0	73,4	0,4	0,3	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 6B	0,03	0,7	0,1	0,01	0	95,4	0,4	0,01	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 7A	0,04	1,8	0,3	0,01	0,1	70,7	0,5	0,1	0,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 7B	0,03	0,6	0,1	0,01	0,1	67,5	0,3	0,01	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 8A	0,03	1,5	0,3	0,01	0	60,6	0,4	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 8B	0,02	0,7	0,1	0,01	0,1	101,7	0,5	0,01	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 9A	0,03	1,6	0,2	0,01	0	110,5	0,5	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 9B	0,02	0,8	0,1	0,01	0	98,8	0,4	0,01	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 10A	0,03	2,5	0,4	0,01	0	95,5	0,4	0,4	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 10B	0,01	0,9	0,1	0,01	0	114,7	0,4	0,2	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 11A	0,02	2,4	0,4	0,01	0	120,3	0,6	0,3	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 11B	0,01	1,1	0,1	0,01	0	61,2	0,4	0,1	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 12A	0,03	3,5	0,4	0,01	0,1	42	0,4	0,5	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 12B	0,01	0,7	0	0,01	0	43,3	0,4	0,1	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 13A	0,02	0,9	0,1	0,01	0	73,3	0,6	0,1	0,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ISO - 13B	0,01	0,7	0,1	0,01	0	89,6	0,5	0,01	0,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 9 - Resultados das análises dos teores dos elementos na primeira série de amostragem e do dolomito.

Identificação	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
Extrator	KCl	KCl	KCl	Mehlich I	KCl	Mehlich I						
Unidades	cmol/dm ³	mg/kg										
2SO - 3A	0,06	1,4	0,4	0,06	0	49,1	0,3	0,1	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 3B	0,02	0,7	0,3	0,15	0	57,2	0,3	0	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 4A	0,04	0,7	0,4	0,04	0	52,6	0,2	0	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 4B	0,05	0,6	0,3	0,01	0,1	38,4	0,2	0	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 5A	0,08	0,9	0,6	0,01	0	39,7	0,2	0,1	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 5B	0,05	0,6	0,3	0,01	0	38,6	0,2	0	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 6A	0,02	1,2	0,2	0,01	0,1	68,6	0,3	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 6B	0,05	1,4	0,9	0,04	0	76,5	0,5	0,08	0,9	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 8A	0,11	1,2	0,6	0,01	0	57,2	0,3	0,3	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 8B	0	0,7	0,3	0,02	0	60,4	0,3	0,01	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 9A	0,04	1	0,5	0,02	0	59,4	0,3	0,2	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 9B	0	0,9	0,6	0,01	0	46,9	0,2	0,01	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 10A	0,08	0,9	0,4	0,02	0	46,1	0,3	0,2	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 10B	0,01	0,6	0,3	0,02	0	54,3	0,3	0,1	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 11A	0,05	0,8	0,2	0,01	0	54,4	0,2	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 11B	0,05	0,8	0,3	0,01	0	43,8	0,2	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 13A	0,09	1,1	0,6	0,01	0,1	30,8	0,2	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 13B	0,02	0,6	0,2	0,01	0	41,9	0,2	0	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 14A	0,15	0,8	0,3	0,01	0	56,3	0,3	0,1	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 14B	0,18	0,8	0,2	0,01	0	56,6	0,3	0,1	0,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 15A	0,05	0,7	0,3	0,01	0	49	0,2	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 15B	0,07	0,6	0,2	0,01	0	29,6	0,2	0,1	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 16A	0,09	0,6	0,2	0,01	0,1	47,1	0,2	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 16B	0,07	0,7	0,4	0,01	0	48,2	0,2	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 17A	0,01	0,9	0,5	0,01	0,1	32,5	0,2	0,1	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
2SO - 17B	0	0,6	0,2	0,01	0	32,2	0,2	0,1	0,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 10 - Resultados das análises dos teores dos elementos na segunda série de amostragem.

A Figura 11 mostra a área de estudo com os pontos amostrados plotados nas duas campanhas. Observa-se que na primeira foram coletadas 13 amostras, e na segunda, 17 amostras. Para trabalhar com a mesma quantidade de pontos, 4 pontos da segunda campanha que apresentavam valores atípicos (*outliers*) em relação ao conjunto de dados foram eliminados da análise global dos resultados.

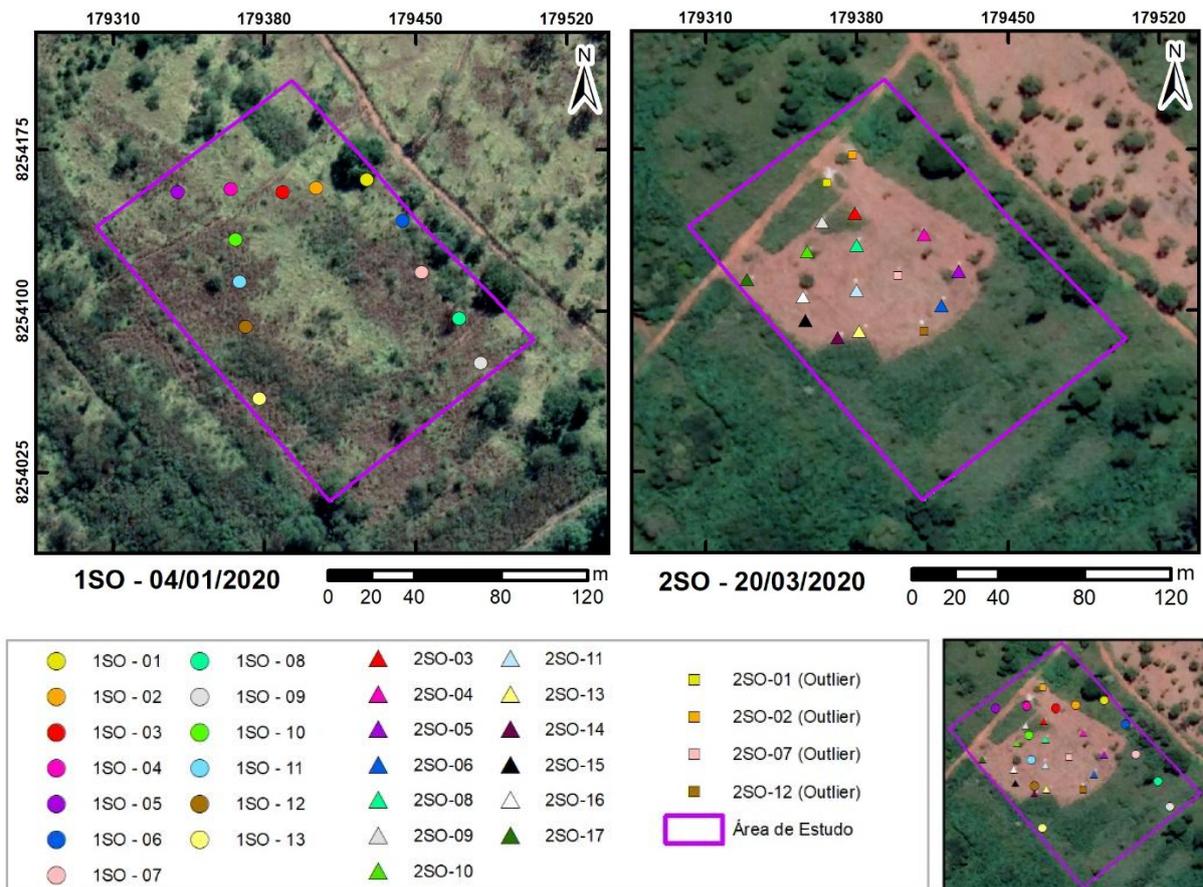


Figura 11 - Pontos coletados na primeira e segunda séries de amostragens.

Os valores de pH em água e KCl para as duas campanhas de amostragens são exibidos na Tabela 11, juntamente com os valores de pH do dolomito utilizado no experimento.

Dentre os metais analisados se fazem presentes aqueles essenciais e não essenciais para o solo e plantas (com provável fonte natural), e os metais leves e pesados (com provável fonte antrópica). Os metais pesados, dependendo de sua concentração e estado de oxidação, podem ser nocivos aos organismos vegetais e animais. Alguns metais não apresentaram resultados uma vez que sua concentração é inferior aos limites de quantificação (LQ) do método analítico utilizado.

É importante salientar que os teores dos elementos e os valores de pH não são correlacionáveis de maneira direta, ou seja, não são correspondentes diretamente, pois foram amostrados em locais distintos. Portanto, a análise e interpretação da dinâmica do experimento são feitas de maneira global sob a ótica estatística.

1ª Campanha de Amostragem			2ª Campanha de Amostragem		
Identificação	pH	pH	Identificação	pH	pH
Tipo de Extrator	Água	KCl	Tipo de Extrator	Água	KCl
1SO - 1A	6,3	5,1	2SO - 3A	6,2	5,8
1SO - 1B	6,1	5,2	2SO - 3B	6,1	5,6
1SO - 2A	6	5,3	2SO - 4A	6,2	5,6
1SO - 2B	5,9	4,9	2SO - 4B	6	5,6
1SO - 3A	6,1	5,3	2SO - 5A	6,1	5,6
1SO - 3B	5,8	5,3	2SO - 5B	6	5,7
1SO - 4A	6,1	5,5	2SO - 6A	6	5,6
1SO - 4B	5,7	5,4	2SO - 6B	6,3	5,7
1SO - 5A	5,9	5,4	2SO - 8A	6,3	5,7
1SO - 5B	5,8	5,5	2SO - 8B	6,1	5,6
1SO - 6A	6	5,6	2SO - 9A	6,2	5,6
1SO - 6B	5,8	5,4	2SO - 9B	6	5,6
1SO - 7A	5,9	5,5	2SO - 10A	6,2	5,5
1SO - 7B	5,8	5,5	2SO - 10B	6,1	5,6
1SO - 8A	6,1	5,6	2SO - 11A	6,1	5,4
1SO - 8B	5,8	5,7	2SO - 11B	6	5,5
1SO - 9A	5,8	5,5	2SO - 13A	6,2	5,9
1SO - 9B	5,6	5,4	2SO - 13B	6,3	5,9
1SO - 10A	5,8	5,4	2SO - 14A	6,1	5,7
1SO - 10B	5,6	5,5	2SO - 14B	6,1	5,9
1SO - 11A	6,2	5,4	2SO - 15A	6	5,8
1SO - 11B	5,6	5,2	2SO - 15B	6	5,8
1SO - 12A	6,7	5,3	2SO - 16A	6	5,6
1SO - 12B	5,5	5,4	2SO - 16B	6,1	5,6
1SO - 13A	6	5,1	2SO - 17A	6,1	5,7
1SO - 13B	5,8	5,4	2SO - 17B	6	5,7
DOLOMITO	7,9	8,4			

Tabela 11 - Resultados de medição de pH em água e KCl e do dolomito usado no experimento da primeira e segunda campanhas de amostragem.

Discussões

O entendimento da estabilização dos metais passa também pelo conhecimento da forma que se encontram e de sua dinâmica no solo. Kabata-Pendias & Adriano (1995) apontam que os metais pesados podem encontrar-se no solo nas seguintes formas: 1) Íons ou complexos dissolvidos na solução do solo; 2) Íons trocáveis associados às cargas negativas da matéria orgânica e de minerais do solo; 3) Íons mais fortemente ligados aos sítios de troca; 4) Formando quelatos insolúveis com ligantes orgânicos ou organo-minerais; 5) Incorporados aos microrganismos e seus resíduos biológicos; 6) Oclusos em óxidos de Fe e Al; 7) Participando da estrutura cristalina de minerais silicatados.

Os processos envolvidos na estabilização dos metais pesados são precipitação, complexação, adsorção, e transformações redox. Tais processos são regidos por propriedades e características químicas e físicas inerentes ao solo e aos metais, tais como: acidez ativa (pH), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), teor de matéria orgânica, potencial óxido-redução, concentração do metal, atividade microbiana, textura e temperatura do solo (Alloway, 1995).

A mobilidade de metais no ambiente supergênico (incluindo todo o perfil pedogênico desde a rocha alterada até os horizontes superficiais mais ricos em matéria orgânica) também é controlada pela carga e pelo tamanho nos íons.

A procedência dos metais pesados no solo pode ser de origem natural (geogênica ou pedogênica) ou de fonte antropogênica. A origem natural dos metais é diretamente relacionada à composição mineralógica do material parental. Portanto, a variedade de rochas existentes deriva em uma diversidade de minerais portadores de metais pesados, e na ocorrência em fases distintas: fase residual, neoformada e dissolvida. A fase residual é composta de minerais com estrutura cristalina muito estável e permanecem no perfil de solo após a evolução dos processos pedogenéticos. A neoformada consiste basicamente dos argilominerais, óxidos e hidróxidos formados com a ação do intemperismo sobre as rochas. E a dissolvida é gerada a partir da hidrólise dos minerais, que libera íons migrantes no perfil e são susceptíveis a precipitação. Por fim, diversas atividades humanas são fonte externa de metais pesados no solo: descarte de resíduos sólidos urbanos, agropecuária (resíduos orgânicos animais, fertilizantes, corretivos etc.), siderurgia, mineração, dentre outras.

As ardósias e metassiltitos que representam o substrato geológico da área estudada não são favoráveis à acumulação de metais pesados nos solos. O titânio e o zircônio têm presença atribuída aos metassedimentos, sendo associados ao rutilo, titanita e zircão, que ocorrem como minerais resistatos. O ferro e o alumínio são também vinculados ao material parental, entretanto, atualmente ocorrem na forma de óxidos e hidróxidos ligados aos minerais neoformados do solo (hematita, goethita, gibbissita). Metais como cobre, chumbo e zinco têm origem vinculada à disposição de resíduos sólidos uma vez que não ocorrem naturalmente nos minerais que compõem as rochas ou o perfil de solos.

O pH foi determinado em água e em solução de KCl, pois segundo Ronquim (2010) quando as amostras são coletadas, geralmente estão úmidas. Devido à umidade natural existe a possibilidade do aumento na concentração de alguns sais no período de coleta, armazenamento, transporte e preparo para análise. Assim, a determinação do pH é afetada, e a leitura do pH em solução salina (no caso, KCl) possibilitaria resultados mais robustos com uma leitura mais estável e efeito sazonal amenizado.

Dentre as propriedades que afetam a estabilização dos metais pesados, Kabata-Pendias & Adriano (1995) afirmam que o pH é um dos fatores que mais tem influência. Segundo eles, a

elevação do pH causa o aumento da CTC pela desprotonação dos grupamentos ácidos da matéria orgânica e da superfície dos óxidos, na formação de hidróxidos, carbonatos e fosfatos insolúveis com os metais traço e na complexação mais efetiva pela matéria orgânica. Portanto, para garantir a permanência efetiva da estabilização dos metais, é necessário o controle e monitoramento do pH (em água e KCl) em uma taxa frequente e assegurar que a fonte não libere mais metais e a ponto de superar a capacidade de retenção do solo.

Em uma mesma linha de conceitos, outros autores apresentam argumentos substanciais que vêm reforçar e contribuir com as interpretações. Manzione & Merrill (1989) afirmam que o pH do solo condiciona a adsorção de metais pesados nos componentes do solo e, portanto, suas solubilidades. A Figura 12 representa graficamente essa relação direta supracitada entre pH e capacidade de adsorção.

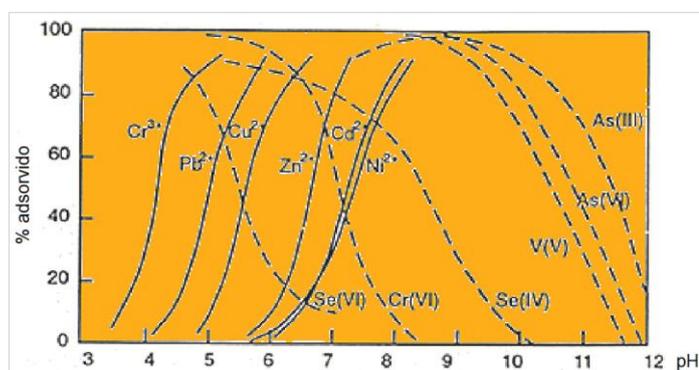


Figura 12 - Influência do pH sobre a adsorção de alguns metais e oxi-ânions metálicos sobre hidróxidos de Fe amorfo.

Na Tabela 12 proposta por Plant & Raiswell (1983, *apud*. Gracia & Dorronsoro, 2018) estão sintetizadas as condições de mobilidade de metais pesados e elementos associados em função das condições de pH e Eh.

Mobilidade	Oxidante	Ácido	Neutro e alcalino	Redutor
Alta	Zn	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au		
Média	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd	Cd	Cd	
Baixa	Pb	Pb	Pb	
Muito baixa	Fe, Mn, Al, Sn, Pt, Cr, Zr	Al, Sn, Pt, Cr	Al, Sn, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd, Pb

Tabela 12 - Mobilidade relativa dos metais pesados segundo o Eh e pH do solo. Fonte: Plant & Raiswell (1983).

De acordo com Föstner (1987, *apud* Huertos & Baena, 2008), o potencial de oxidação-redução determina o estado no qual o metal se encontra em função das cargas dos cátions, que

podem ser mais oxidada (maiores cargas positivas) ou mais reduzida (menores cargas positivas). Os diagramas de fase Eh-pH a certa concentração são usados para mostrar a estabilidade de compostos metálicos e proporcionam um método de se prever o comportamento de metais pesados frente a uma mudança nas condições ambientais (Figura 13).

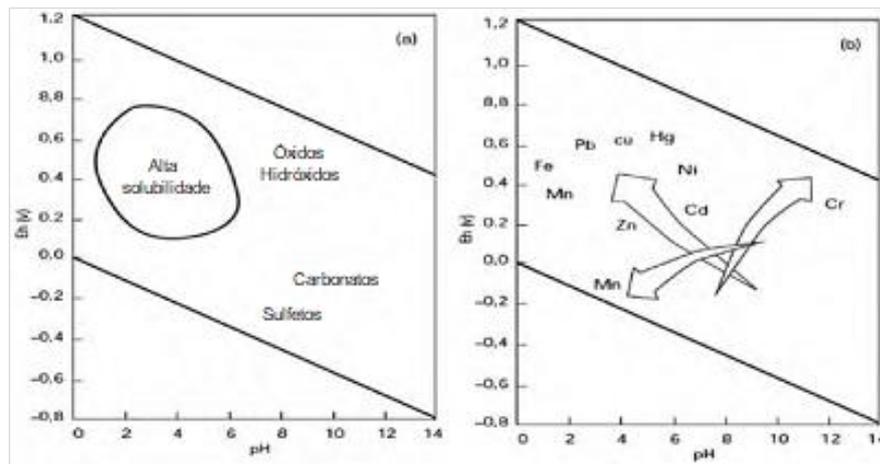


Figura 13 - Solubilidade de metais pesados em função do pH e de Eh (na ausência de matéria orgânica dissolvida ou sólida) (a) os principais minerais que controlam a solubilidade do metais pesados; (b) tendência de aumento da solubilidade dos metais.

Nesse sentido, Kabata-Pendias (1995) aponta que dependendo do metal retido no solo, e das condições físico-químicas sua disponibilidade relativa para plantas será variável e, controlando a possibilidade de incorporação pelos organismos (Tabela 13).

Forma do metal no solo	Mobilidade-Disponibilidade relativa
Íons simples ou complexos em solução	Fácil
Cátions de troca	Média
Metais quelatados por compostos orgânicos	Menos disponíveis
Metais adsorvidos sobre partículas do solo	Menos disponíveis
Compostos metálicos precipitados sobre partículas do solo	Disponíveis quando se dissolve o composto
Metais associados ou incorporados a uma matriz biológica	Disponíveis quando se decompõem
Metal associado ou fazendo parte da estrutura de mineral	Disponível quando se meteoriza/destrói o mineral

Tabela 13 - Disponibilidade relativa de metais retidos no solo para plantas.

Nos resultados das análises e comparação das duas campanhas de amostragens é possível observar que o pH de maneira geral aumenta, tanto em água como em KCl. Da amostragem 1SO (A e B) para a 2SO (A e B) houve um aumento médio de 3,32% do pH em água e 5,36% em KCl. Na amostragem mais rasa (0 a 20 cm), da série 1SO - A para a série 2SO - A houve um aumento médio de 1,01% do pH em água e 5,00% em KCl. Já na amostragem mais profunda (40 a 60 cm), da série 1SO - B para a série 2SO - B houve um aumento médio de 5,75% do pH em água e 5,73% em KCl.

As análises de chumbo mostraram um aumento médio de 12,5% (de 0,64 para 0,72 mg/kg) no seu teor disponível. Uma vez que este metal tem baixa mobilidade no meio pedogênico seu aumento na concentração disponível é atribuído à fonte do material utilizado para a calagem do solo. O pó de dolomito aplicado para a elevação do pH do solo apresenta 1,1 mg/kg de Pb, sendo este o maior teor encontrado em todas as análises realizadas. Mesmo considerando os teores preexistentes e os valores depois da distribuição do dolomito os valores observados estão abaixo até do valor de referência para solos (CETESB, 2014). Dadas as suas condições de mobilidade e o teor final, esse excesso de chumbo possivelmente está adsorvido sobre partículas do solo (óxidos e hidróxidos), quelatados por compostos orgânicos, ou como cátions de troca.

Em contrapartida, o zinco teve uma queda média de 74,9% (0,35 para 0,08 mg/kg) no seu teor disponível. Sua mobilidade é variável conforme as condições do ambiente, portanto o aumento do pH provavelmente influenciou sua crescente estabilização. Como não há minerais nos solos com este metal em sua estrutura cristalina a provável fonte do zinco é considerada como de origem antrópica, em função do descarte de resíduos na área. Como os teores observados estão abaixo do valor de referência (CETESB, 2014) a contaminação da área é considerada como de baixa intensidade. Pela diminuição do seu teor e as suas condições de mobilidade, provavelmente encontra-se quelatado por compostos orgânicos, como cátion de troca, ou como carbonato (Smithsonita - $ZnCO_3$).

O cobre teve um decréscimo médio de 44,9% (de 0,45 para 0,25 mg/kg) no seu teor disponível. Os valores encontrados indicam que o cobre apresenta origem antropogênica, pois não há minerais no material de partida que poderia ser considerado sua fonte primária natural. Tendo em vista a redução do seu teor e a sua mobilidade média a muito baixa devido as condições de pH e Eh, presumivelmente o cobre está adsorvido sobre partículas do solo (óxidos e hidróxidos), quelatados por compostos orgânicos, ou como cátions de troca.

O ferro apresentou uma redução média de 42,7% (de 85,1 para 48,7 mg/kg) no seu teor disponível. Sua ocorrência é natural neste tipo de solo (Latossolo), na forma de óxido (hematita) e hidróxido (goethita). Contudo, a parcela que foi reduzida muito provavelmente está associada a fases não minerais ou mineraloides que na prática são fases sem estrutura cristalina definida. Estima-se que parte do ferro que apresentou diminuição esteja formando complexos com outros metais, por exemplo, formando carbonatos de cálcio, magnésio e ferro (Ankerita – $Ca(Mg,Fe)(CO_3)_2$, considerando também a redução nos teores de cálcio) que são minerais com maior estabilidade no meio pedogênico.

O alumínio teve uma redução média de 16,6% (com média de 0,023 para 0,019 cmol/dm³) no seu teor disponível. Sua ocorrência é natural no tipo de Latossolo presente na área do experimento, sendo associado à estrutura de argilominerais e hidróxidos de alumínio, mas

também na forma trocável (solúvel ou adsorvido na superfície de minerais e fases amorfas). Muito provavelmente, a porção que sofre redução após a elevação do pH é a parcela trocável, pois o alumínio situado na estrutura interna de minerais estáveis não sofre interação ambiental com variações restritas de pH e condições óxido-redução.

Os baixos valores de Na, Mg, Ca e K (bases trocáveis do complexo sortivo) corroboram com as características dos solos com maior grau de intemperismo (Sobral *et al.*, 2015) como o Latossolo Vermelho observado na área. O sódio teve um aumento médio de 100% (variando de 0,01 para 0,02 cmol/dm³) em teor disponível, seu acréscimo na concentração disponível é ligado provavelmente à fonte do material utilizado na calagem e está disponível como íons simples ou complexos em solução, ou cátions de troca. O magnésio mostrou aumento de 61,6% (de 0,23 para 0,37 cmol/dm³) em seu teor médio disponível, também sendo atribuído ao dolomito, e ficou disponível como íons simples ou complexos em solução, ou cátions de troca. O potássio teve um aumento médio de 87% (0,02 para 0,05 cmol/dm³), seguindo a mesma tendência do magnésio e sódio em relação a fonte e forma disponível. Já o cálcio teve uma redução média de 49,1% (de 1,65 para 0,83 cmol/dm³) no seu teor disponível, avalia-se que uma parcela do cálcio que apresentou redução esteja formando complexos com outros metais, provavelmente formando carbonatos (Ankerita - Ca(Mg,Fe)(CO₃)₂), levando em consideração também o decréscimo nos teores de ferro.

Quatro conjuntos (A e B) de amostras da segunda campanha de coleta de amostras apresentavam comportamento de *outliers* e foram desconsideradas convenientemente para equipar com a quantidade de elementos da primeira série. As amostras 2SO-01 A e B possuíam teores discrepantes de cálcio, chumbo, ferro e sódio em relação as médias. Já a 2SO-02 A e B destoava com altos valores de cálcio, cobre e zinco. Altos valores de ferro conferiam a 2SO-07 A e B um caráter atípico em relação aos demais. Já na 2SO-12 A e B, o cálcio que a enviesava da tendência.

Por fim, vale ressaltar que para os elementos que tiveram seus teores reduzidos, não implica necessariamente na remoção ou inatividade permanente do metal. A metodologia empregada de maneira geral acarreta a retenção dos metais de duas maneiras principais: precipitação (como carbonatos) e adsorção (nos óxidos e hidróxidos), portanto em formas efetivas mesmo com uma eventual queda dos valores de pH.

Conforme Huertos & Baena (2008), os óxidos estão finamente dispersos na massa do solo, por isso são muito ativos e devido à sua baixa cristalinidade e pequeno tamanho de partícula, apresentam alta capacidade de sorção para metais divalentes, principalmente cobre e chumbo, e em menor grau zinco, cobalto, cromo, molibdênio, níquel e também arsênio. Afirmam ainda que a presença de carbonatos além de garantir a manutenção de pH elevado, tende a induzir a precipitação dos metais (especialmente como carbonatos) e adsorver determinados

metais.

Com mais tempo de monitoramento é esperado a manutenção na tendência crescente nos valores de pH e conseqüentemente uma redução maior nos teores de metais retidos, seja na forma de precipitada ou adsorvida. E posteriormente, com prováveis condições ambientais favoráveis a mobilidade desses metais, não aconteceria sua liberação devido ao fato de já estarem fora do sistema retidos na estrutura de minerais estáveis ou adsorvidos em fases amorfas.

Considerações Finais sobre Estabilização dos Metais nos Solos

Através do histórico e do levantamento fotográfico da situação da área observou-se que o passivo ambiental existe, e é necessário monitoramento de diferentes formas a se complementar a interpretação da dinâmica da contaminação ou poluição nos diferentes meios possíveis de serem afetados.

As concentrações totais dos metais apresentaram valores homogêneos de acordo com cada série de amostragem. Os teores dos metais que poderiam acarretar contaminação não ultrapassaram os valores de referência de um solo natural de acordo com os valores orientadores da CETESB (2014). Estudos de geofísica (eletrorresistividade) nas proximidades da área (Cavalcanti *et al.*, 2011) indicam valores anômalos de condutividade elétrica nas águas subterrâneas, possibilitando a lixiviação destes metais para a zona saturada, contribuindo para a manutenção da pluma de contaminação.

A partir dos resultados analisados antes e após a calagem, e observando-se que os teores originais já se apresentam reduzidos, caso fossem maiores, provavelmente a técnica utilizada poderia ser ainda mais eficaz na estabilização dos metais. A área piloto em que foi aplicada essa sistemática talvez não tenha sido a mais adequada a este experimento e metodologia, pois se esperava alta contaminação devido a suas características e localização. Contudo, isso não anula o fato de que o procedimento proposto e testado pode ser empregado na mitigação de impactos em áreas com contaminação comprovada de maior magnitude.

Parte dos metais que sofreram redução de teores são considerados como retidos na estrutura de fases amorfas ou na forma de ankerita, que é um carbonato rico em cálcio, magnésio e ferro. A redução dos teores de outros metais é atribuída a sua absorção por fases amorfas. A elevação de magnésio, chumbo e sódio é, sem dúvida, vinculada ao dolomito utilizado para a elevação do pH.

4.4 Recomposição da Vegetação Natural em Áreas Expostas e Degradadas

A remediação e recuperação das áreas que tiveram os solos decapeados e foram submetidas a acumulação de resíduos, mesmo que posteriormente recobertos ou retirados deverão ser alcançadas a partir da recomposição da vegetação nativa. Neste caso o conceito de

fitorremediação é aplicado apenas à revegetação da área com uso de espécies arbóreas de maior porte, uma vez que o diagnóstico mostrou que não há contaminação de metais nos solos para se justificar o uso de espécies vegetais bioacumuladoras. Nem mesmo os solos diretamente associados aos resíduos (em alguns casos enriquecidos em matéria orgânica) apresentaram valores anômalos para metais.

Assim, a área piloto plantada com o objetivo inicial de retenção de metais nos solos (de cerca de meio hectare) foi também considerada como teste de plantio para a recuperação da faixa embargada que compõe uma área de cerca de 60 hectares (300 metros por 2000 metros). A experiência acumulada no acompanhamento da área piloto (com o objetivo inicial de contenção de eventual contaminação por metais) deve ser empregada para ampliação da recomposição da vegetação nativa.

A faixa embargada tem um papel fundamental para a proteção do Parque Nacional de Brasília e desempenha um papel de tampão para absorver cargas de contaminação atmosférica, retenção do escoamento superficial, ampliação da recarga do aquífero freático e por isso deve ter sua recuperação de forma prioritária.

A escolha das espécies deve levar em consideração dois critérios: i) ser espécie arbórea de grande porte de forma que as copas da futura massa florestal possa funcionar como filtro da poluição atmosférica e ii)) apresentar desenvolvimento rápido nas condições de latossolos ácidos e alumínicos (como os encontrados na área). A experiência do plantio na área do lixão e a observação de árvores utilizadas no urbanismo nas cidades no Distrito Federal indicam que as seguintes espécies se enquadram nos critérios: Angico (*Anadenanthera macrocarpa*), Cedro (*Cedrela fissilis*), Landim (*Calophyllum brasiliense*), Jequitibá (*Cariniana estrellensis*), Ipê roxo (*Handroanthus impetiginosus*) e Pata-de-Vaca (*Bauhinia forficata*). Além destas, outras plantas típicas do Cerrado e de mata galeria, que apresentem bom desenvolvimento em áreas de cerrado *sensu strictu*, também devem ser consideradas para se ampliar a diversidade na área recuperada.

Após a definição das espécies a serem plantadas uma etapa importante é a escolha das mudas. A experiência na área piloto mostra que o desenvolvimento mínimo das mudas é um pré-requisito para que as plantas tenham um crescimento maior após o transplante e para minimizar as perdas comuns no início do enraizamento. O investimento na aquisição de mudas de maior porte e maior desenvolvimento é fundamental para o sucesso da revegetação.

A abertura dos “berços” de plantio (“covas”) também é importante. Para as plantas no ambiente do cerrado que apresentam raízes pivotantes, é fundamental que as covas sejam profundas, de forma a favorecer o desenvolvimento inicial das plantas. Assim, a profundidade mínima deve ser de 60 cm e a abertura lateral pode ter dimensões menores. As covas podem ser abertas com moto-coveadoras (Figura 14) ou com auxílio de máquina de maior porte (trator equipado com sistema de broca circular). O plantio deve ser de forma aleatória contendo uma

planta a cada cinco metros, com a intercalação de diferentes espécies por toda a área a ser ocupada pela prática de recomposição da vegetação nativa.

A porção basal da cova deve ser preenchida com solo rico em matéria orgânica (*top soil*) ou matéria vegetal em decomposição e ainda com fertilizantes solúveis. A experiência mostra que a aplicação de uma mistura de pó de rocha dolomítica, com NPK comercial (que é um fertilizante químico solúvel rico em nitrato, fosfato e potássio) e outros fertilizantes naturais (pó de rocha fosfatada, esterco, matéria vegetal triturada e outras fontes de matéria orgânica) é alternativa efetiva e viável.

Quando o plantio não puder ser feito no início do período chuvoso (o que é considerada a prática ideal) um sistema de irrigação deverá ser implantado. Para que o plantio tenha um desenvolvimento mínimo é necessária a irrigação localizada no pé de cada planta com 4 a 5 litros de água por pelo menos duas vezes por semana. A irrigação pode ser feita por regadores manuais em pequenos plantios (Figura 15) ou requerer um auxílio de caminhões tanque e mangueiras para se ampliar a área de atuação e o número de mudas plantadas. Esta etapa é essencial para o primeiro ano de desenvolvimento do plantio, uma vez que o período seco na região é muito longo (de maio a setembro) e o déficit hídrico é muito grande, principalmente nas últimas semanas do período seco. Neste intervalo a irrigação deve ser sua frequência ampliada.



Figura 14 - Moto-coveadora em operação em campo. Este sistema manual permite a perfuração de uma “cova” cilíndrica de até 60 cm de profundidade com 10 cm de diâmetro.



Figura 15 - Irrigação manual com uso de regadores e água bruta captada no córrego Cabeceira do Valo em reservatório de 1000 litros.

No caso do Lixão da Estrutural esta etapa pode ser uma tarefa simples uma vez que a operação da Unidade de Recebimento de Entulhos já requer o uso de caminhões pipa para aspersão de água nas vias de acesso e a mesma estrutura pode ser aplicada à irrigação do plantio no primeiro ano após o plantio.

Todo o plantio deve ser protegido por sistemas de aceiros, de forma a se minimizar os riscos de queimadas florestais no período seco do ano. Os aceiros devem contornar todo o perímetro plantado e ainda incluir sistemas internos para proteção no caso algum tipo de acidente com fogo alcance a área plantada. Esta prática deve ser permanente, pois se trata de uma área periurbana em que as queimadas se dão praticamente em todos os anos (entre os meses de maio e setembro).

Ainda no sentido de se eliminar os riscos de perdas por incêndios florestais a fase de gramíneas que naturalmente se desenvolve entre as mudas deve ser retirada. Este coroamento deve ser preferencialmente feito manualmente com uso de enxadas no com auxílio de roçadeira. Além de minimizar o risco de queimadas esta ação também diminui a concorrência entre as árvores e as gramíneas de forma a se ampliar o crescimento das plantas.

O controle de formigas cortadeiras é um fator crítico para o sucesso do plantio, uma vez que se trata de um tipo de praga muito comum que afeta preferencialmente as árvores no início de seu desenvolvimento. No primeiro ano do plantio as inspeções das áreas plantadas devem ser diárias, pois no intervalo de poucos dias estes insetos podem eliminar dezenas de mudas no início de seu crescimento (Figura 16).



Figura 16 - Formigas cortadeiras em ataque a muda recém-plantada.

No primeiro ano após o plantio pelo menos duas etapas de fertilização devem ser realizadas. A fertilização pode ser feita com qualquer tipo de melhorador de solos, mas o uso de NPK comercial é uma prática aconselhável, por se tratar de um produto solúvel que pode ser incorporado rapidamente aos solos e recuperado pelas raízes das plantas. No caso de se optar pelo uso de NPK, deve-se aplicar cerca de 50 gramas por cova e o material deve ser espalhado junto ao pé de cada planta (Figura 17). Após a aplicação do fertilizante pode-se acumular matéria orgânica em decomposição junto à cova (Figura 18), para se minimizar a perda de umidade nos períodos de recessão de chuvas e ainda ser uma fonte de nutrientes para as plantas.



Figura 17 - Cobertura de NPK em planta em início de desenvolvimento. Os grânulos devem ser depositados na depressão da cova original para se ampliar a efetividade da fertilização.



Figura 18 - Recobrimento do pé da planta com capim seco para manutenção da umidade, principalmente no período seco do ano.

Para o caso da área do Lixão da Estrutural sugere-se que a recomposição da vegetação nativa seja feita por etapas sucessivas com plantio de cerca de 10 hectares por ano, de forma que, em seis anos a área possa ser totalmente recuperada. Esta prática poderá permitir que os solos sejam preparados no período seco de cada ano, para que o plantio seja feito no início do período das chuvas e que todas as melhores práticas possam ser aplicadas. Para que a recuperação da vegetação nativa alcance o resultado desejado e a máxima efetividade do investimento, é essencial, que pelo menos um trabalhador fique permanentemente responsável pelas inspeções diárias nas áreas plantadas. Dentre suas ações devem se destacar: avaliação do desenvolvimento das plantas nos estágios iniciais, replantio de mudas perdidas, acompanhamento da irrigação, inspeções diárias do ataque de pragas (com estaque para as formigas cortadeiras), avaliação periódicas dos sistemas de aceiros de fogo e demais ações de proteção das parcelas de plantios.

O custo de aplicação desta importante ação de recuperação ambiental da área pode ser dividido em duas parcelas: i) implantação das áreas plantadas e ii) manutenção do plantio. Os investimentos para implantação deverão ser divididos ao longo de seis anos e o custeio da manutenção poderá ser efetivamente minimizado, pois será possível diluir os custos dentro dos contratos e processos da própria operação da Unidade de Recebimento de Entulhos.

4.5 Estabilização da Pluma de Contaminação

A estabilização da migração e espalhamento da pluma de contaminação de chorume passa pelo bombeamento e tratamento ou reinjeção dos efluentes. Idealmente o fluido bombeado deveria ser tratado e lançado em um corpo receptor. Entretanto, devido às limitações vinculadas ao custo de tratamento, a porção da pluma retirada por bombeamento poderá ser reinjetada no

maciço de resíduos. A reinjeção no maciço é uma técnica que resulta em oxidação, precipitação e diminuição da toxidez do contaminante. No caso específico do Lixão da Estrutural estima-se que amônia deverá sofrer oxidação para nitrato e que a DQO será reduzida a cada movimentação completa no circuito bombeamento-reinjeção.

Como o fluxo da água em um meio natural migra de um ponto de maior carga hidráulica para um ponto de menor carga, a estabilização do fluxo deve passar pela inversão local do fluxo natural a partir da criação de um cone de depressão junto aos poços de rebaixamento e bombeamento. Desta forma, para a contenção da pluma e se evitar que o fluxo migre em direção às nascentes é necessária a instalação de poços de bombeamento na forma de baterias isoladas, nos locais em que a pluma apresenta maior concentração de contaminantes.

Esta ação deverá complementar a atenuação e depuração natural que o próprio aquífero já desenvolve como uma de suas funções primordiais. A localização das baterias de poços foi determinada a partir do diagnóstico ambiental (Produto 3) e visa a contenção da migração da pluma nos locais com maior concentração da contaminação. Como a maior parte da pluma com maior concentração migra em direção ao córrego Cabeceira do Valo, serão posicionadas duas baterias de poços naquele setor e uma bateria na porção oposta, próximo ao limite com o Parque Nacional de Brasília (Figura 19). A bateria do setor leste deverá ser composta por cinco poços, pois, as vazões e a área afetada por contaminação de grande concentração, naquela região, são menores.

Testes hidráulicos foram realizados em poços para se verificar suas vazões potenciais e o respectivo rebaixamento. No dia 12/02/2021 o poço LX12, com nível estático de 7,71 metros foi bombeado por duas horas, com vazão de 2.500 L/h, até que o nível se estabilizou em 11,98 metros. O rebaixamento de 4,27 metros é suficiente para manter a pluma estável com fluxo de oeste para leste. No dia 17 de março mais dois poços foram testados hidráulicamente, com bombeamento de 2.500 L/h, produzindo os seguintes resultados: Poço LX13 nível estático de 6,54 metros, com bombeamento por 2,5 horas alcançando o nível dinâmico de 9,41 metros (rebaixamento de 2,87 metros) e Poço LX5 (nível estático de 2,70 metros e nível dinâmico de 3,82 metros) com bombeamento por 40 minutos e estabilização a partir de 2 minutos após início do teste e recuperação instantânea. Os resultados dos testes nos poços LX13 e LX5 mostram que para a contenção da pluma será necessário o aumento da vazão com uso de bomba com maior potência.

Poços construídos em solos argilosos em ardósias apresentam vazões muito reduzidas e dificilmente poderiam contribuir para o rebaixamento do nível freático em barreiras hidráulicas.

A Figura 20 mostra como o estabelecimento do cone de depressão de poços pode causar a inversão do fluxo e a contenção da migração do contaminante produzindo uma área do aquífero livre dos efluentes em direção a jusante.



Figura 19 - Carta imagem com a localização dos poços que deverão compor cada bateria de bombeamento. Imagem de 29 de maio de 2020 obtida do sistema *Google Earth*.

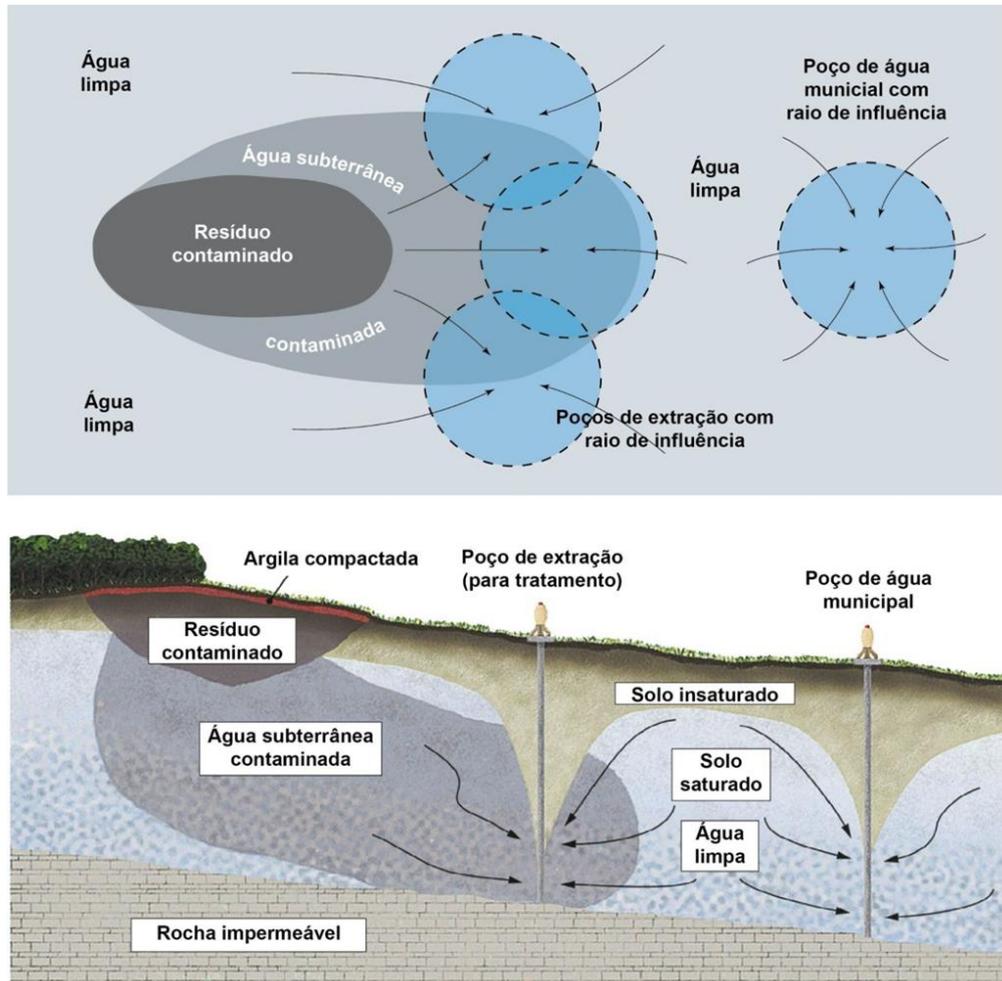


Figura 20 - Ilustração do sistema de contenção da pluma por barreira hidráulica. Em projeção horizontal (superior) e em seção (inferior). Com a contenção da pluma, a água que flui em direção ao poço municipal ou para o curso d'água superficial é desprovida dos contaminantes (Brusseau *et al.* 2019).

Os dados hidrodinâmicos dos aquíferos freáticos são suficientes para a determinação do número de poços que deverão compor cada bateria, uma vez que se acumulam dados oriundos dos testes de infiltração *in situ*, descrição dos perfis construtivos e pedo-litológicos, Slug Test, além dos testes de bombeamento em poços selecionados.

A locação das baterias de poços para composição da barreira hidráulica foi feita pela integração de: locais com maior concentração da pluma de contaminação, locais com presença de materiais arenosos em profundidade e poços com as maiores vazões.

A hidráulica de poços e os mecanismos que controlam o rebaixamento em aquíferos considerados homogêneos e isotrópicos, além de livres devem ser norteados pelo método de Neuman aplicado a esta categoria de reservatório subterrâneo (Freeze & Cherry, 1979; Driscoll, 1986; Fitts, 2002 e Fetter, 2004).

Nas baterias de poços situadas a oeste a distância entre os poços varia entre 50 e 100 metros, por se tratar de uma região rica em material arenoso em subsuperfície. Na bateria de leste os poços deverão apresentar uma distância de cerca de 40 metros para se alcançar o mesmo objetivo de rebaixamento.

A água contaminada bombeada a partir das baterias de poços de leste deverá ser encaminhada para as piscinas de chorume já instaladas e posteriormente reinjetado nos mesmos sistemas em que o chorume é atualmente disposto com auxílio de caminhões-pipa. A bateria situada a oeste deverá injetar o efluente no Poço de Injeção localizado a 350 metros a sudoeste na borda do maciço de resíduos. Caso seja necessário, um pequeno reservatório pode ser instalado nas proximidades da bateria para se viabilizar a ligação da tubulação adutora para a reinjeção.

Como o objetivo é a inversão do fluxo do Sistema Aquífero Freático, os poços deverão ser rasos (até 30 metros) com ampla seção filtrante e com espaço anelar preenchimento com pré-filtro silicoso, fino (0,4 a 0,6 cm) em bem selecionado. O diâmetro de perfuração deverá ser de 7 polegadas e o revestimento de 4 polegadas de diâmetro. A porção rasa do poço (5 metros iniciais) deverá ser concretado, compondo o sele sanitário do poço. A Figura 21 mostra o perfil padrão do poço que deverá ser instalado nas baterias de bombeamento.

As bombas deverão ser de 2,5 polegadas de diâmetro com capacidade de bombeamento de até 3 m³/h. Considerando que cada bateria de poço tenha de 3 a 5 poços, espera-se bombear uma vazão de 9 a 15 m³/h o que é suficiente para causar o rebaixamento de alguns metros da superfície potenciométrica livre e a inversão do fluxo de forma convergente em direção à bateria de poços.

As baterias de poços deverão ser submetidas a constante vigilância para se evitar vandalismos e furtos de equipamentos (principalmente cabos elétricos e bombas submersíveis), os quais, infelizmente ocorrem de forma constante na área do Lixão e adjacências.

O bombeamento deverá ser realizado durante 12 h diárias de forma simultânea em todos os poços que compõem cada bateria de bombeamento, preferencialmente durante o período noturno, quando a energia elétrica tem menor custo.

Após instalação das baterias de poços e início de operação do sistema de rebaixamento os três sistemas deverão ser monitorados para obtenção dos seguintes dados:

- valor total do rebaixamento em cada poço individualmente pelo bombeamento por pelo menos 6 horas contínuas;
- avaliação do rebaixamento a partir do bombeamento simultâneo de todos os poços que compõem a bateria de rebaixamento;
- avaliação do tempo de recuperação dos níveis depois de interrompido o bombeamento; e
- determinação da vazão de bombeamento de cada bateria.

Estas informações serão aplicadas para a gestão do material bombeado, desde a definição dos parâmetros químicos médios do efluente, passando pela capacidade da estação de tratamento, volume dos reservatórios auxiliares, até a determinação das vazões máximas para reinjeção no maciço (caso esta seja a alternativa adotada).

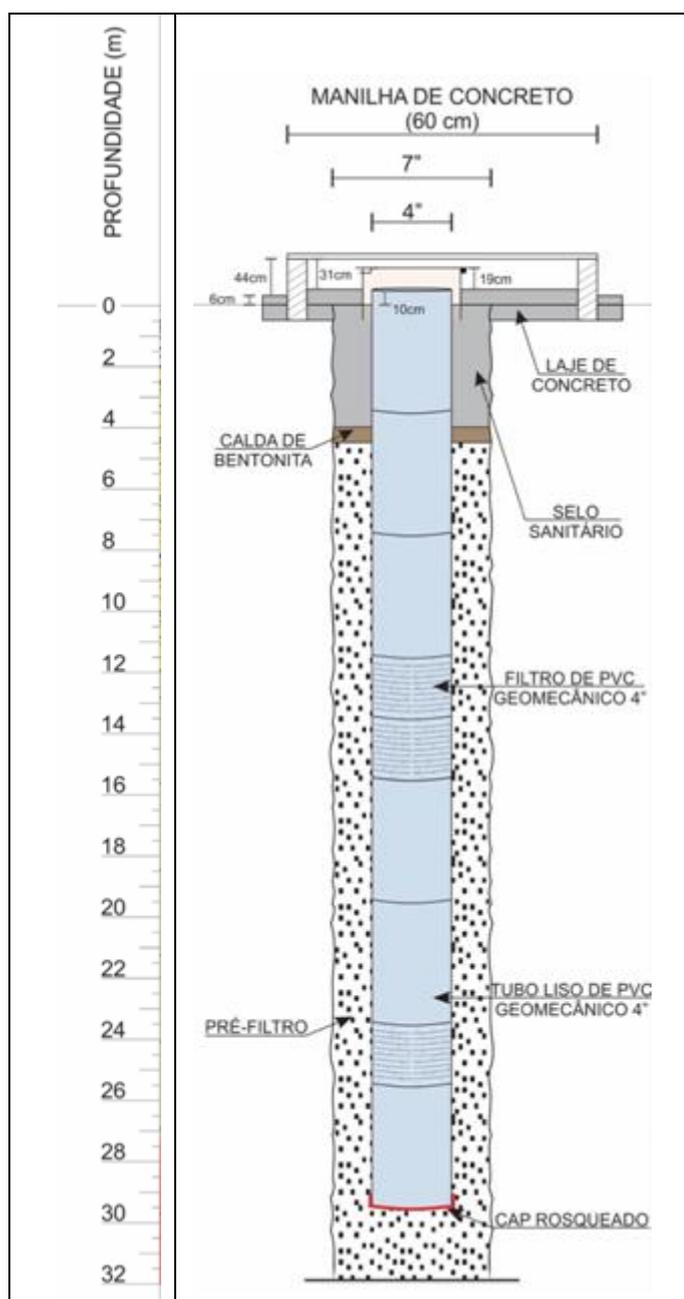


Figura 21 - Perfil típico do poço individual que deverá compor cada bateria de rebaixamento.

4.6 Tratamento de Efluente da Pluma de Contaminação

Com relação ao tratamento de efluentes bombeados da pluma de contaminação os experimentos estão em fase de montagem e verificação.

Dois testes deverão ser realizados: tratamento não convencional com uso de filtro de zeólita para remoção ou redução de amônia e fitorremediação com auxílio de algas no formato *wetland* construída.

A amônia é a fase mais reduzida da série nitrogenada e é originada a partir da decomposição da matéria orgânica acumulada no lixão. Sua origem primária é em grande parte vinculada a restos de alimentos, cascas de frutas, matéria vegetal e outros restos orgânicos. A decomposição anaeróbia leva à conversão de nitrogênio em amônia que pode ser oxidada para

nitrito e posteriormente para nitrato. Fase nitrogenada com elevado teor de amônia e com baixo teor de nitrato confirma que se trata de um ambiente de decomposição altamente redutor (Vesilind & Morgan, 2013; Singh *et al.*, 2005). Amônia é uma fase altamente tóxica que tem como valor máximo permitido para potabilidade o valor de 1,5 mg/L, e como todas as substâncias da séria nitrogenada apresenta grande dificuldade de tratamento.

O teste preliminar com zeólita para redução de amônia foi feito a partir do contato de 25 litros da água do Poço 12 com 4 quilos de zeólita granular (com granulometria variando de 0,3 a 0,6 cm) com agitação. Este experimento alcançou o resultado apresentado na Tabela 14, sendo que as amostras Amostra LX12-02, Amostra LX12-02A e Amostra LX12-02B se referem a amostragem inicial as 8h:00 da manhã, amostragem as 12h:00 e às 16h:00.

	LX12-02	LX12-02A	LX12-02B
CE	4.800	3.320	2.880
SO₄²⁻	144	14	114
Cl⁻	530	475	602,5
NH₄⁺	325	60,3	17,3
NO₃	0,2	1,0	0,7
DQO	283	100	103
Ca²⁺	35,1	31,9	76,8
Mg²⁺	33,7	12,3	32,0
Na⁺	235	267	500

Tabela 14 - Resultados de análises submetidas a agitação e contato com zeólita granular. CE em $\mu\text{S}/\text{cm}$ e demais substâncias em mg/L. Em verde destacadas as substâncias que sofreram redução e em amarelo aquelas que sofreram elevação.

As análises mostram forte redução dos teores de amônia com diminuição de 325, para 60,3 e na última amostra para 17,3 mg/L. A redução da DQO foi significativa, entretanto, estabilizou já após 4h de contato com a zeólita. Por outro lado, o sódio apresentou forte elevação de 235 para 500 mg/L após 8 horas de contato; o cálcio apresentou elevação de 35,1 para 76,8 mg/L e o cloreto elevação de 530 para 602,5 mg/L em oito horas de contato com a zeólita.

A redução da amônia já era esperada, pois este mineral é utilizado de forma comercial em sistemas de tratamento de efluentes para redução da amônia (Hedström, 2001; Kotoulas, 2019). A diminuição da DQO deve ser associada aos mesmos mecanismos que resultam na redução da amônia, isto é, a partir de trocas iônicas.

O aumento do sódio é vinculado à solubilização da zeólita que é um mineral com alto poder de dissolução e rico neste cátion, conforme sua composição química: $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{SiO}_3\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, com fórmula geral $(\text{Na-Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al.Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36-12}\text{H}_2\text{O}$. Esta elevação pode ser um problema, pois na porção da pluma que foi amostrada o teor inicial estava no limite da potabilidade e na última amostra após 8h de contato com a zeólita o teor ultrapassa o limite máximo permissível, pela legislação.

Os experimentos deverão ser ampliados com aplicação de outras técnicas não convencionais para tratamento de efluentes.

5. ANÁLISE DE VIABILIDADE AMBIENTAL, TÉCNICA E ECONÔMICA

De certa forma a avaliação da viabilidade dos pilotos instalados ficou prejudicada depois que se constatou que os solos não estavam contaminados por metais, como considerado no início do desenvolvimento da pesquisa de campo. Neste caso, os testes pilotos de fitorremediação descritos como FT-01 e FT-02 perderam sua função como pretendido desde a formulação do termo de referência para realização dos estudos.

Assim, será realizada uma análise global para a viabilidade técnica, ambiental e econômica dos pilotos testados e das ações propostas para mitigação dos problemas, conforme informações contidas na Tabela 15.

Ação	Viabilidade Ambiental	Viabilidade Técnica	Viabilidade Econômica
Fitorremediação de solos contaminados por metais FT-01 e FT-02	Elevada	Inviável, pois os solos não se apresentam contaminados	Moderada, ação com custo de implantação médio a elevado
Estabilização de metais no solo	Elevada	Elevada, resultados alcançados mesmo em condição de não contaminação	Elevada, ação de baixo custo
Recomposição da vegetação nativa de áreas expostas e degradadas	Elevada	Elevada	Moderada em função da ampla área a ser tratada
Estabilização da pluma de contaminação	Elevada	Elevada, técnica simples e já testada em diferentes locais	Moderada a baixa, em função do tempo de aplicação da técnica
Tratamento de efluente da pluma de contaminação	Elevada	Moderada, necessidade de se testar diferentes técnicas	Inviável, em função do grande volume de efluente e do custo por m ³
Reinjeção dos efluentes no maciço de resíduos	Elevada	Elevada	Moderada, sendo vinculada ao custo de energia para o bombeamento

Tabela 15 - Discriminação da viabilidade das ações propostas para mitigação dos impactos decorrentes da operação do Lixão da Estrutural.

A fitorremediação tem sido desenvolvida na maior parte das aplicações na forma de estudos de casos para contaminantes específicos, entretanto, nos Estados Unidos e Canadá já existem ações em que esta técnica é realizada de forma comercial em escala industrial. Nestes casos, esta técnica se mostra com ampla viabilidade técnica, ambiental e econômica. No caso do Lixão da Estrutural, a aplicabilidade se mostra reduzida, pois não há contaminação por metais.

A técnica utilizada para estabilização de metais nos solos apresentou ampla viabilidade técnica, ambiental e econômica, mesmo após a constatação da restrita concentração de metais

por fontes antropogênicas nos solos. Os resultados do experimento, com a redução da mobilidade do ferro e alumínio, indicam que esta técnica pode ser aplicada para áreas contaminadas por acumulação de metais.

A recomposição da vegetação nativa de áreas expostas e degradadas é uma ação com ampla viabilidade ambiental, no sentido de auxiliar a solucionar questões amplas referentes à ecologia da região (incluindo fauna e flora). Da mesma forma, é tecnicamente viável, pois já foi testada em diferentes situações no bioma Cerrado e apresenta resultados importantes, mesmo em alguns anos após sua implantação. Com relação à viabilidade econômica é considerada moderada, pois para a efetivação desta ação, além do plantio *sensu strictu*, envolve a reconformação do relevo local, controle de pragas e incêndios, coberturas por fertilizantes, irrigação nos períodos secos dos anos iniciais após o plantio, além dos demais custos associados.

A estabilização da pluma de contaminação apresenta ampla viabilidade técnica e ambiental, pois se trata de uma técnica já consagrada e utilizada para diferentes tipos de plumas de contaminação de águas subterrâneas. A viabilidade econômica, contudo é considerada moderada a baixa, pois requer investimentos na instalação dos sistemas de bombeamento (baterias de poços, bombas, sistemas de alimentação elétrica, reservatórios auxiliares, e outras despesas), além de elevado custo de operação dos sistemas (energia elétrica, segurança, reposição de equipamentos, entre outras).

O tratamento de efluentes é uma das principais ações para atenuação da toxidez de cargas contaminantes. Contudo, sua viabilidade é vinculada ao custo unitário do tratamento por metro cúbico e ao volume a ser tratado. No caso em estudo, a viabilidade ambiental é considerada muito alta, pois pode mitigar o principal efeito negativo vinculado ao lixão. A viabilidade técnica é considerada moderada, pois ainda não existem métodos universais aplicados para tratamento de plumas de choroume com diferentes graus de concentração de substâncias contaminantes. Neste sentido, inúmeras técnicas deverão ser testadas até se determinar aquela mais eficiente para depuração simultânea de amônia, cálcio, magnésio e redução da DQO. A maior questão que limita a adoção das técnicas de tratamento da pluma é seu custo, por se tratar de um volume *in situ* muito grande, e em processo contínuo de renovação a partir da recarga que se processa no interior do maciço de resíduos.

A reinjeção dos efluentes da pluma de contaminação no maciço de resíduos é uma ação com elevada viabilidade ambiental e técnica, pois deve conter a migração e o espalhamento da pluma (protegendo os aquíferos e os cursos d'água superficiais), além de ser uma prática comumente adotada em diferentes sistemas similares. Por outro lado, sua viabilidade econômica é considerada moderada em função do consumo de energia elétrica para se proceder ao bombeamento do efluente até os poços de injeção que estão situados em posição topograficamente mais elevada que a cota das baterias de poços que deverão compor a barreira

hidráulica.

Com relação à avaliação das vantagens *versus* desvantagens de se efetivamente implantar as técnicas propostas, as seguintes considerações podem ser enumeradas:

- a fitorremediação não apresenta vantagem de implantação, pois não foi constatada a efetiva contaminação dos solos nas áreas adjacentes aos locais de acumulação dos rejeitos. Mesmo as amostras obtidas diretamente da cobertura do maciço de resíduos, em alguns casos com enriquecimento em matéria orgânica, não apresentaram teores anômalos de metais;
- a estabilização dos metais nos solos resulta no mesmo tipo de avaliação que foi aplicada às técnicas de fitorremediação, não apresenta vantagem ou desvantagem de implantação pelo fato dos solos não estarem contaminados por metais. Contudo, os resultados alcançados indicam que a técnica pode ser aplicada em locais em que os solos se encontrem efetivamente contaminados por metais;
- a recomposição da vegetação nativa de áreas expostas e degradadas é uma ação que apresenta grande vantagem com relação a sua não implantação. Neste sentido vale destacar a importância que a “área embargada” exerce na proteção do Parque Nacional de Brasília, e a recomposição da vegetação daquela faixa deverá ampliar de forma significativa esta função. Para se alcançar a máxima efetividade é importante que a escolha das espécies e o manejo desde o plantio até o controle de pragas e demais ações sejam feitos sob a ótica das melhores práticas ecológicas (diversificação das espécies a serem plantadas; aplicação de práticas de manejo de baixo impacto; evitar o uso de herbicidas, etc.); com máximo uso de técnicas naturais e baseadas na natureza (como uso de rochagem para a remineralização e fertilização dos solos, uso de massa vegetal triturada como fonte de matéria orgânica, etc.);
- o tratamento de efluente da pluma de contaminação é uma ação que resulta em ampla vantagem com relação ao não tratamento. O recurso hídrico gerado após do tratamento poderá ser utilizado como insumo de produção agrícola ou simplesmente ser lançado em corpos receptores ampliando a oferta de águas para diferentes usos. A desvantagem da implantação desta técnica é vinculada ao seu elevado custo. Os recursos financeiros eventualmente aportados para a depuração dos efluentes até níveis de potabilidade podem ser utilizados para outras diferentes aplicações com maiores ganhos ambientais e sociais (desde que bem direcionados). A título de exemplo, a economia financeira vinculada ao não tratamento pode ser aplicada à construção de moradias populares para minimizar a questão da ocupação irregular de Santa Luzia; à melhoria do isolamento e ampliação da segurança do Parque Nacional de Brasília (em áreas adjacentes ao Lixão da Estrutural); na contenção da pluma de contaminação; além da implantação de outras ações prioritárias na recuperação da área impactada e suas adjacências;
- a reinjeção dos efluentes no maciço de resíduos apresenta vantagens no sentido de limitar a migração e ampliação da pluma e apresentar baixo custo global em termos de instalação e

operação. Esta é uma técnica que pode ser considerada como já testada, pois os dados mostram que o aquífero freático local apresenta amplo poder de retenção das cargas contaminadas, mesmo a pequenas distâncias dos centros de produção do chorume (diminuição de mais 90% de espécies contaminantes em apenas 60 metros de migração da pluma). Da mesma forma, é uma técnica consagrada e comumente aplicada em diversos casos de lixões e aterros de resíduos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo conceitual da contaminação e as propostas de intervenção para mitigação dos impactos foram desenvolvidos com base nas diretrizes da Associação Brasileira de Normas técnicas - ABNT, com aplicação das NBRs 16210 e 16784-1.

O modelo conceitual da contaminação se inicia na coleta e transporte do lixo doméstico nos vários núcleos urbanos do Distrito Federal, e sua acumulação na área do antigo lixão, durante um período maior que 50 anos. Após compactação e aterramento dos resíduos, os processos de decomposição anaeróbica são iniciados gerando o chorume que migra verticalmente para a zona saturada do aquífero e posteriormente migra lateralmente em direção às nascentes (de forma mais efetiva em direção ao Córrego Cabeceira do Valo). Ainda em condições anaeróbicas há geração de gases de efeito estufa, principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) que são liberados para a atmosfera e se somam a outros elementos de poluição do ar como gases de combustão e particulados atmosféricos. Além das águas subterrâneas, águas superficiais e atmosfera, os solos em áreas adjacentes ao lixão também sofreram degradação e compõem parte da matriz no modelo conceitual da contaminação.

As campanhas completas de amostragem de águas subterrâneas alcançaram os mesmos resultados obtidos na campanha preliminar. Estes resultados mostram que os principais indicadores da contaminação das águas subterrâneas são: amônia, cloreto, sódio, cálcio e magnésio e demanda química de oxigênio - DQO, sendo que a condutividade elétrica das águas é o melhor parâmetro para mostrar a distribuição espacial da contaminação das águas subterrâneas.

Com relação às intervenções para mitigação, remediação ou eliminação dos problemas os seguintes resultados q proposições podem ser enumeradas:

i) a elevação do pH é eficaz para a minimização da biodisponibilidade e estabilização de metais nos solos, mesmo considerando que as coberturas pedogenéticas locais não apresentem níveis de contaminação críticos, os resultados mostraram diminuição dos metais além de Fe e Al. Para se alcançar melhores resultados da aplicação esta técnica é importante controlar a qualidade do dolomito aplicado para elevação do pH dos solos;

ii) a recuperação de solos degradados, particularmente a faixa de 300 metros (embargada para acumulação de resíduos) deverá ser alcançada com a recomposição da vegetação nativa por espécies arbóreas de médio e grande porte. A experiência acumulada durante o desenvolvimento

do experimento de fitorremediação dos solos deverá ser aproveitada para esta etapa de implantação, com destaque para a manutenção do plantio nos primeiros anos (irrigação, controle de pragas, manutenção de aceiros, etc.);

iii) a poluição atmosférica é um problema efetivo, principalmente no período seco do ano. Mesmo considerando que os dados disponíveis sejam quantitativos (devido à inexistência de estações de monitoramento), as ações atualmente desenvolvidas são consideradas efetivas para sua minimização, incluindo: queima dos gases de efeito estufa (que deve ser intensificada) e aspersão de água nas vias de acesso com trânsito mais intenso de veículos (com auxílio de caminhões-pipa);

iv) a redução da poluição dos aquíferos deverá ser alcançada com a instalação de barreiras hidráulicas vinculadas a baterias de poços em locais com condições críticas e posterior tratamento dos efluentes bombeados (preferencialmente) ou, no mínimo, com reinjeção no maciço de resíduos;

v) a contaminação do Córrego Cabeceira do Valo, pela descarga do aquífero poluído, deverá ser minimizada a partir da implantação das ações para mitigação da pluma de contaminação dos aquíferos freáticos (instalação de barreira hidráulica a partir de bateria de poços de bombeamento);

vi) a impermeabilização da porção norte do maciço de resíduos, que é a porção mais crítica de geração atual de chorume, é uma ação não testada por este estudo, mas que deverá resultar em ampla efetividade no impacto global do antigo lixão.

A escolha das técnicas a serem aplicadas para minimizar os efeitos nocivos dos compartimentos contaminados deverá passar pela avaliação dos pilotos instalados e testados, bem como por uma análise de viabilidade econômica. Após decisão das técnicas mais adequadas a serem implantadas, as instituições envolvidas e responsáveis pela instalação, manutenção e fiscalização das ações deverão ser definidas.

Os dados de variação de níveis freáticos mostram um comportamento distinto entre os poços situados em áreas naturais e em áreas modificadas (urbanizadas e com aterro) (Tabela 17, Apêndice). A elevação dos níveis se dá de forma mais rápida nas áreas não naturais, e responde ao início das chuvas de forma mais lenta nos locais de solos não perturbados. No momento em que se completar um ano de medições de dados, ou no mínimo um ciclo completo de valor mínimo e máximo, será possível estimar a recarga efetiva dos aquíferos nos diferentes ambientes estudados.

Posteriormente, os resultados sobre as estimativas de recarga dos aquíferos serão aplicados no desenvolvimento de modelos de diluição da pluma de contaminação e evoluir até a geração de informações sobre a atenuação natural da contaminação e capacidade de filtragem das cargas contaminantes pelo próprio sistema aquífero.

Os dados de monitoramento das temperaturas (Tabela 18) também podem ser utilizados para mostrar a distribuição da contaminação, contudo a sensibilidade deste parâmetro não é suficiente para um mapeamento detalhado. Os pontos mais críticos de geração de chorume mostram as maiores temperaturas: > 40°C no poço PCX-01 e próximo a 30°C no poço PX-Norte. As anomalias também são observadas nos demais poços em que a contaminação se mostra mais crítica, como por exemplo, nos poços LX-12, LX13, LX14, PX-Moinho e PX-Entrada.

Os dados de condutividade elétrica das águas (Tabela 19) são os mais apropriados para a determinação da distribuição da contaminação das águas subterrâneas como um todo, pois, agrega todos os cátions e ânions dissolvidos nas águas dos aquíferos freáticos.

Embora a contaminação dos aquíferos freáticos seja o principal problema de contaminação vinculado ao Lixão da Estrutural, o *risco à saúde humana* da população residente na zona urbana consolidada da Cidade Estrutural é mínimo, uma vez que aqueles habitantes não são abastecidos por água subterrânea, mas pelo sistema de abastecimento integrado do Descoberto, exclusivamente mantido por mananciais superficiais. O risco atual é apenas associado a parte da população da ocupação Santa Luzia, que utiliza água captada a partir de poços escavados. Neste caso, a ingestão de água contaminada, por tempo prolongado, pode resultar em problemas de saúde, mais especificamente associados às seguintes Substâncias Químicas de Interesse: amônia e nitrato, além de patógenos não avaliados de forma sistemática pelo presente trabalho.

Durante a eventual continuidade do monitoramento realizado pelo presente estudo sugere-se que sejam integrados alguns poços escavados situados na área de Santa Luzia à rede de monitoramento, especificamente para análises de potabilidade, incluindo os seguintes indicadores: pH, amônia, nitrato, cálcio, magnésio, sódio, cloreto, coliformes totais e coliformes termotolerantes.

Com relação à aplicação dos resultados para a proposição e implantação de políticas públicas para solução dos problemas, podem-se enumerar as seguintes ações que em seu conjunto deverão auxiliar o Governo do Distrito Federal nesta questão:

- Enumerar as secretarias e gerências que deverão estar à frente da questão com a determinação de responsabilidades e delegação de funções específicas com prazos para alcance das metas;
- Internalizar, divulgar, discutir e repercutir os resultados deste projeto nos diferentes órgãos que compõem a estrutura de governo, desde as secretarias diretamente envolvidas com as questões ambientais, até outras autarquias, agências e fundações que podem auxiliar na solução dos problemas;
- Realizar seminários setoriais para divulgação e discussão dos resultados, com o propósito de cotejar diferentes ideais e propostas sobre a mesma questão. Neste sentido, devem ser discriminadas reuniões técnicas com instituições de pesquisa acadêmica (Universidade de

Brasília, Universidade Católica e outras); instituições federais de controle ambiental (MMA, IBAMA, ICMBio, e outras); Ministério Público Federal e outras organizações que podem ser posteriormente identificadas;

- Iniciar as tratativas para geração e canalização de recursos financeiros para custear as ações necessárias à eliminação ou mitigação dos impactos ambientais negativos observados;
- Publicar e manter e registros formais e públicos dos resultados e das discussões, de forma a se evitar descontinuidade das ações em função das futuras mudanças dos atores envolvidos na questão (desde governos até técnicos responsáveis pela tomada de decisões);
- Integrar a questão ambiental às questões sociais que atualmente estão evidentes na região do Lixão da Estrutural, mais particularmente com a situação da ocupação de Santa Luzia.

APÊNDICES

Poço-Amostra	LX1-02	LX3A-02	LX4A-02	LX5-02	LX6-02	LX7-02	LX7A-02	LX8-02	LX9-02	LX10-02	LX12-02	LX13-02
Parâmetro												
Prof. Amostragem	10,0	10,0	10,0	15,0	20,0	20,0	8,5	20,0	20,0	18,0	20,0	15,0
Cond. Elétrica.	19	36,9	35,7	295,0	68,4	462	6.000,0	519,0	449,0	408,0	4.800,0	3.480,0
Temp.	23,4	23,2	23,7	23,7	23,9	23,8	24,9	24,1	23,1	22,8	26,2	23,5
pH	7,61	7,98	7,32	8,92	7,49	9,12	9,22	9,41	9,64	9,07	8,07	7,82
Amônia	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	3,2	386,0	<LQ	<LQ	<LQ	325,0	81,6
Nitrito	<LQ	0,021	0,027	0,055	0,005	0,002	0,247	0,012	<LQ	0,004	<LQ	0,240
Nitrato	0,4	0,3	<LQ	0,5	0,2	<LQ	2,9	<LQ	0,2	0,2	0,2	9,3
Cloreto	0,9	5,6	5,5	13,0	1,9	1,5	466,0	6,8	6,6	10,1	530,0	552,5
Sulfato	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	56,0	<LQ	<LQ	<LQ	144,0	<LQ
DQO	13,0	24	3,13	7,0	19,0	15,0	265	<LQ	<LQ	31	283,0	80,0
Antimônio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Arsênio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Bário	<LQ	0,03	<LQ	0,021	0,026	0,030	0,183	0,032	0,041	0,032	0,065	0,359
Cádmio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Chumbo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Cobalto	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Cobre	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,0097	<LQ
Crômio	<LQ	<LQ	0,019	0,021	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Mercúrio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Níquel	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Zinco	0,075	0,079	0,072	0,058	0,065	0,049	0,068	0,053	0,036	0,051	0,069	0,045
Cálcio	4,74	4,19	4,19	43,7	10,1	52,9	27,4	56,6	41,3	42,9	35,1	112,0
Magnésio	1,99	0,6	0,45	20,5	0,79	26,9	24,3	25,7	18,6	20,4	33,7	61,0
Sódio	1,33	0,76	5,06	5,17	4,78	3,91	441,0	13,9	15,1	8,52	235,0	220,0

Poço-Amostra Parâmetro	LX14-02	LX15-02	LX16-02	LX17-02	LX18-02	LX19-02	LX20-02	PX ENTR-02	PX MOINHO-02	PX NORTE-02	PX1-02	PCX1-02
Prof. Amostragem	20,0	20,0	15,0	15,0	15,0	15,0	2,0	20,0	20,0	21,0	15,0	21,0
Cond. Elétrica.	364,0	182,4	158,2	303,0	223	322	49,5	75,9	698,0	15.350	798,0	16.150,0
Temp.	24,1	24,2	23,2	24,1	25,0	23,4	23,5	27,4	25,8	29,4	31,5	42,6
pH	7,92	7,18	8,35	8,73	9,04	8,78	7,59	6,8	8,77	9,15	7,51	7,84
Amônia	<LQ	<LQ	0,7	<LQ	<LQ	0,2	<LQ	<LQ	77,2	1.710,0	32,4	1.825,0
Nitrito	0,122	0,010	<LQ	0,003	0,018	<LQ	<LQ	<LQ	0,015	<LQ	0,003	<LQ
Nitrato	13,0	15,3	0,2	0,2	<LQ	0,2	1,0	0,3	0,3	8,7	0,7	4,7
Cloreto	50,4	17,8	2,4	8,9	7,6	15,0	1,9	2,6	52,8	1.145,0	44,0	1.424,0
Sulfato	<LQ	<LQ	<LQ	42,0	<LQ							
DQO	51,0	14,0	21,0	39,0	26,0	15,0	7,0	29,0	32,0	2.060,0	32,0	2.420,0
Antimônio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ							
Arsênio	<LQ	<LQ	0,1622	<LQ	0,0235							
Bário	0,022	0,019	0,069	2,39	0,092	0,015	<LQ	<LQ	<LQ	0,042	0,040	0,259
Cádmio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ							
Chumbo	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,274	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,095	<LQ	<LQ
Cobalto	<LQ	<LQ	0,049	<LQ	0,054							
Cobre	<LQ	0,0043	<LQ	<LQ	0,0393	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,0034	<LQ	0,0034
Crômio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,034	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,064	<LQ	0,086
Merúrio	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ							
Níquel	<LQ	<LQ	0,142	<LQ	0,148							
Zinco	0,128	0,066	0,052	0,041	0,121	0,073	0,057	0,044	0,048	0,117	0,033	0,082
Cálcio	31,2	3,9	13,8	33,6	30,9	61,1	<LQ	7,44	2,33	19,5	46,2	33,4
Magnésio	1,92	1,0	1,03	2,39	3,16	27,6	0,14	0,5	0,35	19,8	7,21	49,5
Sódio	6,26	29,9	3,63	11,2	38,2	3,05	13,4	5,91	36,3	1.000,0	30,2	1.180,0

Tabela 16 - Dados de análises de amostras coletadas em poços de monitoramento sobre o lixão e adjacências. Profundidade de amostragem em metros; Condutividade Elétrica em $\mu\text{S}/\text{cm}$; Temperatura em $^{\circ}\text{C}$; demais substâncias em mg/L . LQ - limite de quantificação do método analítico.

Amostragens realizadas em 16 de novembro de 2020.

Data / Poço	29/08/20	19/09/2020	10/10/2020	31/10/2020	16/11/2020	11/12/2020	04/01/2021	29/01/2021	10/02/2021	22/03/2021	28/04/2021	19/05/2021
LX-1	5,45	5,70	5,92	6,06	6,01	5,90	5,68	5,35	5,33	3,86	4,33	4,65
LX-2	3,37	3,57	3,70	3,67	3,32	3,43	2,88	3,07	2,86	2,16	2,56	2,82
LX-3A	8,51	8,79	10,24	10,47	9,18	9,28	9,25	10,34	23,6	10,10	7,51	8,09
LX-4A	1,25	1,32	1,24	1,35	1,23	1,29	1,18	1,24	1,19	0,97	1,05	1,11
LX-5	3,83	4,04	4,17	4,25	4,00	4,05	3,68	3,86	3,79	2,80	3,20	3,43
LX-6	6,46	6,69	6,89	7,05	6,90	6,95	6,65	6,72	6,67	5,34	5,69	5,97
LX-7	12,80	13,03	13,18	13,52	13,68	13,88	14,04	14,14	14,19	13,40	12,91	13,08
LX-7A	8,50	8,72	8,97	9,20	9,35	9,54	9,68	9,84	9,92	9,20	8,94	9,02
LX-8	13,92	14,08	14,26	14,43	14,55	14,75	15,93	15,08	15,16	14,68	14,58	14,63
LX-9	11,78	11,92	12,09	12,24	12,32	12,47	12,56	12,69	12,76	12,13	11,96	12,17
LX-10	9,11	9,34	9,57	9,76	9,81	9,96	9,90	10,09	10,10	8,79	9,00	-
LX-11	6,90	6,99	7,06	7,07	-	7,13	7,09	7,17	-	-	-	7,00
LX-12	7,80	7,96	8,09	8,18	8,08	8,07	7,52	7,64	7,71	6,02	-	7,50
LX-13	8,22	8,41	8,58	8,59	8,47	8,51	7,97	8,11	8,10	6,65	-	7,76
LX-14	9,93	10,14	10,34	10,50	10,51	10,56	10,21	10,28	10,32	9,00	-	9,70
LX-15	8,22	8,24	8,24	8,05	7,76	7,53	7,37	7,62	7,36	7,22	-	7,77
LX-16	8,99	9,49	9,92	9,87	9,52	9,57	8,85	8,94	8,77	6,39	-	8,12
LX-17	15,41	15,71	16,00	16,23	16,03	15,87	15,78	15,58	15,57	14,38	14,28	14,45
LX-18	6,37	6,63	6,85	6,96	6,78	6,72	6,34	6,22	6,13	5,12	5,20	5,43
LX-19	5,58	5,81	6,02	6,14	5,99	5,95	5,61	5,50	5,37	4,44	4,60	4,82
LX-20	1,28	1,37	1,45	1,42	1,26	1,30	1,08	1,18	1,07	0,81	0,94	1,04
PX-Norte	21,14	21,27	21,31	21,39	21,23	21,48	21,54	21,54	21,50	20,76	20,76	21,30
PX-Moinho	13,59	13,85	14,11	14,40	14,58	14,72	14,43	14,64	14,56	12,98	13,42	13,67
PX-Entrada	17,55	17,86	18,16	18,43	18,43	18,37	17,90	17,63	17,69	15,94	16,28	16,67
PCX-1	21,46	21,53	21,60	21,67	21,63	21,53	21,32	21,13	21,13	11,80	12,10	12,43
PX-1	10,05	10,20	10,36	10,46	10,26	10,28	9,51	9,72	9,81	7,90	8,98	8,90

Tabela 17 - Histórico dos dados de níveis freáticos em poços de monitoramento (medidas em metros).

Obs.: os poços PCX-1 e PX-1 foram substituídos a partir do dia 22/03/2021.

Data / Poço	29/08/20	19/09/2020	10/10/2020	31/10/2020	16/11/2020	11/12/2020	04/01/2021	29/01/2021	10/02/2021	22/03/2021	28/04/2021	19/05/2021
LX-1	23,1	23,7	23,8	23,2	23,4	23,1	23,1	23,8	23,5	23,8	23,3	22,9
LX-2	22,8	23,4	23,1	22,7	23,0	22,6	22,9	23,7	23,1	23,5	23,0	22,7
LX-3A	22,5	22,8	23,3	22,3	23,2	22,8	23,4	24,3	23,6	23,6	23,4	23,7
LX-4A	23,3	22,9	23,8	22,8	23,7	23,6	23,4	24,8	24,5	24,4	24,1	23,7
LX-5	23,6	23,9	24,2	22,8	23,7	23,3	23,6	24,3	23,9	24,2	23,7	22,9
LX-6	24,2	23,5	23,9	23,1	23,9	23,4	23,4	24,0	24,7	24,3	23,7	23,1
LX-7	23,2	23,6	23,7	22,9	23,8	23,0	23,2	23,6	23,7	22,7	23,2	22,9
LX-7A	23,4	23,9	24,0	23,4	24,9	23,4	23,6	24,0	24,4	23,2	23,3	23,2
LX-8	23,3	23,9	23,7	23,3	24,2	22,9	23,1	23,7	25,0	24,8	23,6	22,8
LX-9	23,1	22,8	22,8	22,2	23,1	22,1	22,9	23,0	24,7	23,3	23,3	22,1
LX-10	22,9	22,6	23,8	22,2	22,8	22,6	22,5	22,8	23,1	23,0	23,5	-
LX-11	23,1	24,3	24,3	23,2	-	24,2	24,1	24,3	-	-	-	24,3
LX-12	27,3	26,6	28,9	26,6	26,2	26,2	26,8	27,1	26,4	26,8	-	26,4
LX-13	24,6	25,4	24,0	23,3	23,5	24,2	23,7	23,9	23,9	24,0	-	24,1
LX-14	23,8	24,2	25,4	23,6	24,1	24,1	24,3	24,5	24,3	24,5	-	24,6
LX-15	23,9	23,7	24,2	23,3	24,2	23,4	24,0	23,9	23,9	24,6	-	24,6
LX-16	23,4	23,6	25,6	23,0	23,8	23,0	23,5	23,9	24,4	23,7	-	23,9
LX-17	23,6	23,6	24,0	23,4	24,1	22,8	23,4	23,9	24,2	22,8	23,8	23,2
LX-18	23,1	23,6	24,1	24,0	25,0	22,9	24,0	23,8	24,4	2,7	24,0	23,8
LX-19	23,1	23,6	24,2	23,9	23,4	23,7	23,3	23,5	23,8	23,0	23,9	23,0
LX-20	23,6	24,2	23,4	22,7	23,5	23,2	23,4	23,9	23,4	23,7	24,2	22,8
PX-Norte	26,9	28,5	28,5	27,0	29,4	26,8	27,7	28,4	28,2	29,2	29,9	26,2
PX-Moinho	23,6	24,9	25,2	24,3	25,8	24,4	24,4	24,8	24,5	24,0	24,2	24,4
PX-Entrada	26,6	27,1	26,9	27,4	27,4	26,9	27,0	27,8	25,5	25,9	26,9	26,7
PCX-1	41,6	42,7	42,9	41,8	42,6	42,1	41,1	41,6	42,3	36,0	36,8	35,4
PX-1	28,8	31,5	31,8	29,5	31,5	30,6	27,8	30,8	31,2	27,7	27,2	27,0

Tabela 18 - Histórico dos dados de temperatura das águas de amostras obtidas de poços de monitoramento (medidas em °C).

Obs.: os poços PCX-1 e PX-1 foram substituídos a partir do dia 22/03/2021.

Data / Poço	29/08/20	19/09/2020	10/10/2020	31/10/2020	16/11/2020	11/12/2020	04/01/2021	29/01/2021	10/02/2021	22/03/2021	28/04/2021	19/05/2021
LX-1	24,6	17,78	16,49	20,7	19,08	20,18	12,0	14,52	-	40,0	82,7	67,5
LX-2	177,9	199,1	213,6	255,0	268,0	279,0	179,0	331,0	229,0	183,4	217,0	371,0
LX-3A	50,0	21,72	36,8	23,4	36,9	27,4	13,06	27,3	19,99	8,99	6,79	4,86
LX-4A	75,1	36,8	41,3	36,8	35,7	35,2	30,7	32,2	32,0	29,0	26,3	25,6
LX-5	418,0	361,0	299,0	324,0	351,0	367,0	370,0	387,0	313,0	294,0	305,0	281,0
LX-6	110,6	100,7	82,9	75,3	68,4	64,5	54,7	51,8	51,7	51,7	48,6	38,4
LX-7	463,0	496,0	498,0	532,0	522,0	543,0	520,0	533,0	527,0	475,0	469,0	483,0
LX-7A	4.040,0	6.230,0	4.005,0	3.790,0	6.000,0	3.020,0	4.510,0	6.580,0	7.090,0	6.740,0	6.360,0	4.070,0
LX-8	424,0	463,0	493,0	516,0	519,0	546,0	565,0	559,0	559,0	573,0	556,0	550,0
LX-9	406,0	429,0	440,0	452,0	449,0	469,0	472,0	467,0	441,0	467,0	453,0	456,0
LX-10	422,0	428,0	411,0	417,0	408,0	420,0	394,0	395,0	377,0	371,0	264,0	-
LX-11	2.460,0	1.162,0	1.468,0	1.061	-	599,0	631,0	599,0	-	-	-	696,0
LX-12	4.730,0	4.600,0	4.570,0	3.480,0	4.800,0	4.560,0	4.280,0	3.220,0	3.320,0	3.620,0	-	3.650,0
LX-13	2.670,0	2.240,0	1.960,0	3.440,0	3.480,0	2.720,0	2.730,0	2.700,0	2.250,0	2.770,0	-	2.141,0
LX-14	319,0	346,0	352,0	370	364,0	359,0	349,0	342,0	299,0	307,0	-	253,0
LX-15	195,5	185,3	188,7	183,3	182,4	183,9	170,4	186,6	175,1	187,6	-	186,0
LX-16	164,7	203,5	188,6	169,4	158,2	183,5	122,7	120,1	117,3	153,0	-	140,9
LX-17	203,7	284,0	301,0	307,0	303,0	330,0	257,0	280,0	291,0	226,0	195,4	179,7
LX-18	157,9	194,4	196	194,6	223,0	216,0	214,3	213,8	217,0	224,0	60,0	38,4
LX-19	283,0	453,0	431,0	423,0	482,0	451,0	475,0	423,0	431,0	412,0	391,0	393,0
LX-20	45,1	45,4	47,0	47,4	49,5	50,0	50,2	52,7	52,2	53,7	60,1	57,7
PX-Norte	18.230	17.690,0	17.960,0	18.220,0	15.350,0	15.540,0	15.370,0	15.590,0	15.330	13.310,0	19.290,0	14.560,0
PX-Moinho	778,0	994,0	977,0	909,0	689,0	979,0	1.021,0	995,0	1.037,0	1.082,0	1.039,0	1.094,0
PX-Entrada	100,3	92,9	84,0	101,4	75,9	85,4	182,2	132,4	146,4	175,4	159,3	148,4
PCX-1	15.470,0	15.540,0	15.910,0	16.460,0	16.150,0	17.380,0	16.550,0	14.710,0	15.020,0	23.500,0	25.100,0	24.500,0
PX-1	327,0	315,0	327,0	331,0	798,0	869,0	874,0	893,0	907,0	7.050,0	6.960,0	7.050

Tabela 19 - Histórico dos dados de condutividade elétrica das águas em poços de monitoramento (resultados em $\mu\text{S/cm}$).

Obs.: os poços PCX-1 e PX-1 foram substituídos a partir do dia 22/03/2021.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. 2011a. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15515-1: Passivo ambiental em solo e água subterrânea. Parte 1: Avaliação preliminar. 47p.
- ABNT. 2011b. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15515-2: Passivo ambiental em solo e água subterrânea. Parte 2: Investigação confirmatória. 19p.
- ABNT. 2013a. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16210: Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas - Procedimento. 8p.
- ABNT. 2013b. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15515-3: Avaliação de passivo ambiental em solo e água subterrânea. Parte 3 - Investigação detalhada. 22p.
- ABNT. 2013c. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16209: Avaliação de risco a saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas. 40p.
- ABNT. 2020. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16784-1: Reabilitação de áreas contaminadas - Plano de intervenção Parte 1: Procedimento de elaboração. 14p.
- Alloway, B.J. 1995. Heavy metals in soil. Londres. 339p.
- Arraes, T.M.; Maia-Júnior, J.P.; Costa, P.N.; Rodrigues, L.S.; Sousa, V.H.V. 2005. Hidroquímica das águas subterrâneas profundas do Distrito Federal. Relatório de Estágio Supervisionado. (Instituto de Geociências, Universidade de Brasília). 16p.
- Brusseau M.L.; Pepper I.L.; Gerba C.P. 2019. Environmental and Pollution Science. Academic Press. 633p.
- 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.; Bogossian, J.; Carvalho, R.M. 2012. Sedimentology of the Psammo-pelitic-carbonate Unit, Paranoá Group, and Sete Lagoas Formation, Bambuí Group: examples of mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in the Proterozoic of the Brasília Fold Belt. Revista Brasileira de Geociências, 42(3):513-522.
- Campos, J.E.G.; Dardenne, M.A.; Freitas-Silva, F.H.; Martins-Ferreira, M.A.C. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. Brazilian Journal of Geology, 3(43):461-476.
- Cavalcante, M.M., Borges, W.R., Rocha, M.P., Cunha, L.S., Seimetz, E.X. 2011. Investigação Geofísica (Eletrorresistividade e GPR) nos Limites do Lixão da Estrutural e do Parque Nacional de Brasília – DF (Resultados Preliminares). Twelfth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro/RJ. 6p.
- CETESB. 2014. Decisão de diretoria nº 004-2014/E/C/I - Aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo - CETESB, São Paulo.
- CETESB (2016). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-de-solo-agua-subterranea/>
- CLIMATE-DATA.ORG/AM OP/OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. 2020. CLIMA BRASÍLIA: Temperaturas e Precipitações médias. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/distrito-federal/brasil-852/>. Acesso em: 20 jun.
- Codeplan. 2017. *Atlas do Distrito Federal*. Brasília. Secretaria de Educação e Cultural/CODEPLAN. 114 p.
- CONAMA. 2009. Resolução Conama 420. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o

- gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. 20p.
- Costa, C.N. 2005. Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. 126p.
- Cunha, L.S.; Borges, W.R.; Roriz L.E.S. 2021 Histórico do Antigo Aterro Controlado do Jockey Clube (Lixão da Estrutural, Brasília-DF). *In: Brasil, C.P. Cunha, L.S.; Frontin, S.O. (Org.) Hibridização de Fontes de Geração de Energia Elétrica em Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos Urbanos. Estudo de caso: Aterro Controlado do Jockey Clube (Lixão da Estrutural, Brasília, DF) p. 138-154.*
- 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.
- Driscoll, F.G. 1986. Groundwater and Wells. Johnson Screen, St. Paul, Minnessota. 2ª ed. 1089p.
- Fetter, C.W. 2004. Applied Hydrogeology. Fourth Edition. MacMillan College Publ. Co. New York. 619 pp.
- Fitts, C.R. 2002. Groundwater Science. Academic press.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, New York. 604pp.
- Garcia, I.; Dorronsoro, C. 2018. Contaminación del suelo: Tema 15-Contaminación por metales pesados. Disponível em: <<http://www.edafologia.net/conta/tema15/introd.htm>>. Acesso em: 09 jul. 2020.
- Guedes, M.R. 2008. Metais pesados em solos: ocorrência. Disponível em:<<http://scienceblogs.com.br/geofagos/2008/07/metaispesados-em-solos-ocorrencia.php>>. Acesso em: 06 abril, 2020.
- Hedström, A. 2001. Ion exchange of ammonium in zeolites: A literature review 1. J. Environ. Eng. 127(8):673-681.
- Huertos, E.G.; Baena, A.J.R. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía: Macla, Madri, 10:48-60.
- Kabata-Pendias, A. 1995. Agricultural problems related to excessive trace metal contentsof soils. Heavy Metals, ed. W. Salomons, U. Förstner & P. Mader, Springer-Verlag, Berlim. p. 3-18.
- Kabata-Pendias, A.; Adriano, D.C. 1995. Trace metals. In: REICHCIGL, J. E. Soil amendments and environmental quality. p.139-167.
- Kotoulas, A.; Agathou, D.; Triantaphyllidou, I.E.; Tatoulis, T.I.; Akratos, C.A.; Tekerlekopoulou, A.G.; Vayenas, D.V. 2019. Zeolite as a potential medium for ammonium recovery and second cheese whey treatment. Water, 11, 136; doi: 10.3390/w11010136.
- Luz, A.B. 1995. Zeólitas: Propriedades e usos industriais. Rio de Janeiro: CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL/CNPq, 35p.
- Manzione M.A.; Merril, D.T. 1989. Trace metal removal by iron co-precipitation: Field evaluation. Electric Power Research Institute, Report GS-6438, jun.
- Martins, E.S. & Baptista, G.M.M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In IEMA/SEMATEC/UnB 1998. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. Vol. 1, Parte II. 53p.

- Martins, C.A.S.; Nogueira, N.O.; Ribeiro, P.H.; Rigo, M.M.; Candido, A.O. 2011. A dinâmica de metais-traço no solo. R. Bras. Agrocência, Pelotas, 17(3-4):383-391.
- Moreira, D.A.; Martinez, M.A.; Souza, J.A.R.; Matos, A.T.; Reis, C.; Reis, E.L. 2010. Determinação das características de resíduo sólido urbano aterrado. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, 7(1):099-108.
- Pinto, M.N. 1994. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: PINTO, M. N. (Org.). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. 2. ed. rev. ampl. Brasília: UnB: SEMATEC. Cap. 9:285-344.
- Reatto, A.; Martins, E.S.; Farias, M.F.R.; Silva, A.V.; Carvalho Jr., O.A. 2004. Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Documentos, Planaltina, DF, 120 1-31. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/566388/1/doc120.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2020.
- Ronquim, C.C. 2010. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. 1. ed. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. 26 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).
- Singh, K.P.; Singh, V.K.; Mallik, A.; Basant, N. 2005. Distribution of nitrogen species in groundwater aquifers of an industrial area. Environment Geochemistry and Health, Amsterdam 28 (5):473-485.
- Silva, F.C.; Eira, P.A.; Barreto, W.O.; Pérez, D.V.; Silva, C.A. 1998. Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo: métodos usados na Embrapa Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 40p. (Documentos, 3).
- Sobral, L.F.; Barreto, M.C.V.; Silva, A.J.; Anjos, J.L. 2015. Guia prático para interpretação de resultados de análise de solo. Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju, 13 p. (Documentos, 206).
- Vesilind, P.A.; Morgan, S.M. 2013. Introdução à Engenharia Ambiental. São Paulo: Cengage Learning.

8. EQUIPE TÉCNICA

Membros da Equipe do Projeto e Responsáveis Técnicos

José Eloi Guimarães Campos
Geólogo, Coordenador do Projeto

Julio Henrichs de Azevedo
Engenheiro Agrônomo, Massa Foliar e Química dos Solos

Colaboradores

Lucas Santos Batista Teles
Geólogo, Monitoramento de Água Subterrânea e Experimento de Tratamento da Pluma

Drielly Souza Rodrigues
Geóloga, Monitoramento de Água Subterrânea e Amostragem de Solos

Ricardo Avelino Costa
Estudante de Geologia, Experimento de Estabilização de Metais nos Solos

Brasília, 20 de junho de 2021.