



III-715 - DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE CROMO EM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E AVALIAÇÃO DE RISCO AMBIENTAL PARA APLICAÇÕES BENÉFICAS

Julia Villalta da Silva⁽¹⁾

Estudante de Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista ICT-UNESP).

Amanda Maria Dantas de Jesus⁽²⁾

Química Licenciatura (2008) e Mestre em Ciências (2010) pela Universidade Federal de Sergipe. Doutora em Química (2014) pela Universidade Federal de São Carlos. Pós-doutoranda pela UNESP (2024).

Magda Hirsch de Carvalho⁽³⁾

Engenharia Química pela Faculdade de Engenharia Industrial(1994), especialização em Engenharia em Saúde Pública e Ambiental pela Faculdade de Saúde Pública - USP(1996) e aperfeiçoamento em MBA Gestão Empresarial FIA/SABESP pela Faculdade FIA de Administração e Negócios(2016).

Fabiana Alves Fiore⁽⁴⁾

Graduada em Engenharia Civil (UFMG); Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG); Doutora em Saneamento e Meio Ambiente (FEC/UNICAMP); Livre-docente em Gerenciamento de Resíduos Sólidos (UNESP). Professora do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT/UNESP).

Endereço⁽¹⁾: Rua Roberto da Matta Ribeiro, 110 - Jardim Hípica Pinheiro - Taubaté - SP - CEP: 12092-833 - Brasil - Tel: (12) 99133-7144 - e-mail: julia.villalta@unesp.br

RESUMO

O processo de potabilização nas Estações de Tratamento de Água (ETA) gera o lodo de ETA (LETA), considerado um resíduo não perigoso e não inerte. A destinação adequada do LETA visa mitigar os impactos ambientais, uma vez que o seu lançamento *in natura* do LETA pode alterar as condições do meio, contaminando águas subterrâneas com efeitos de difícil remediação. Por isso, pesquisas focam na identificação de metais pesados, como o cromo. A presença desse elemento pode ser prejudicial à saúde, sendo essencial a realização de ensaios que simulem as condições reais do ambiente para analisar o impacto ambiental da destinação desses resíduos, garantindo uma gestão ambiental sustentável e a conformidade com as regulamentações. O objetivo do presente estudo foi determinar a presença de Cr no LETA e o potencial risco ambiental da sua destinação em solos, avaliando os extratos lixiviados e solubilizados das amostras, a fim de verificar o potencial de carregamento do elemento em condições naturais. Os resultados mostraram-se favoráveis à aplicação benéfica, sem a ocorrência de potenciais danos à saúde humana e à contaminação ambiental, tornando viáveis diversas alternativas para disposição e reuso de LETAS ambientalmente seguras, além da possibilidade de comprovação para a reclassificação do material.

PALAVRAS-CHAVE : Lodo; Cromo; Avaliação de risco ambiental; Aplicações benéficas.

INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é um direito humano essencial, fundamental e universal, indispensável à vida com dignidade (ONU, 2010). Para assegurar a qualidade da água disponível para consumo, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) implementam uma série de processos, incluindo coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção, correção do pH e fluoretação (SOUZA, 2010). No entanto, estes procedimentos resultam na geração de um resíduo conhecido como lodo de ETA, cuja origem está



principalmente nas etapas de sedimentação e filtração (SILVA, 2011). A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 10.004 classifica o LETA como resíduo sólido (ABNT, 2004), dessa forma, sua destinação final requer procedimentos adequados visando o reaproveitamento em ciclos produtivos, redução do volume gerado e mitigação dos impactos ambientais de acordo com os princípios estabelecidos na Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 (BRASIL, 2010). Com a criação de leis cada vez mais restritivas, o setor passa a se preocupar não somente com a qualidade da água potável fornecida, mas, também com a água bruta captada, com os insumos químicos utilizados, a otimização dos processos envolvidos e com a redução, reciclagem ou ainda reuso e disposição final dos resíduos gerados.

De acordo com Richter (2001), o lodo de ETA é considerado como um resíduo composto de água e sólidos suspensos contidos na própria água, acrescidos dos produtos químicos aplicados durante o processo de seu tratamento. Grandin *et al.* (1993) reportam que esses resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos são provenientes da água bruta, tais como algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, etc. Além de outros metais pesados que podem fazer parte dos sedimentos em águas fluviais devido a poluentes arrastados pelo deflúvio superficial urbano ou mesmo por despejos de efluentes industriais nos mananciais que alimentam as estações de tratamento.

Por sua composição, o lançamento inadequado de LETAs *in natura* nos corpos hídricos altera por muitas vezes a concentração de metais pesados no meio ambiente, através de sua disseminação no solo, na atmosfera e na água, o que tem sido motivo de preocupação em todo o mundo. Os metais presentes nesses resíduos podem ser carregados por meio líquido como água pluvial, infiltrando-se no solo, atingindo o lençol freático e contaminando a água subterrânea. A contaminação dessas águas tem efeitos que persistem por tempo indeterminado e são de difícil remediação (MAGOSSI e BONACELLA, 1991).

A investigação da concentração dos metais pesados nos LETAs tem sido o foco de diversos estudos nos últimos anos. Essa preocupação se justifica pelo fato de esses metais, ao entrarem em contato com os organismos através da ingestão de alimentos, água e ar contaminados, podem representar riscos graves à saúde, principalmente aos níveis tróficos superiores das cadeias alimentares. O processo de bioacumulação e bioamplificação, onde os metais se concentram ao longo da cadeia alimentar, pode levar a níveis críticos que comprometem a saúde dos organismos. Por isso, é fundamental considerar todas as rotas de exposição, desde a fonte dos metais até o organismo, ao analisar os riscos da poluição ambiental (BRADL, 2005).

Um exemplo de metal que pode gerar graves consequências é o Cromo (Cr). O cromo possui diferentes estados de oxidação, sendo mais comum os cromos (II), (III) e (VI), também denominados cromo bi, tri e hexavalente, respectivamente. As formas tri e hexavalente são mais estáveis e aparecem na composição de óxidos, sulfatos, cromatos, dicromatos e sais básicos. A soma das duas espécies é o que conhecemos por cromo total. A forma metálica não é encontrada livre na natureza, mas obtida após o processamento industrial do minério de cromo. A maior parte das suas emissões para o ambiente é de origem antrópica, principalmente emissões industriais. Cerca de 40% do metal está disponível na forma hexavalente e a maior parte advém das atividades humanas. Ele é derivado da oxidação industrial do crômio obtido da mineração e possivelmente da queima de combustíveis fósseis, madeira e papel (CETESB, 2022).

A população geral pode estar exposta ao cromo por alimentação ou contato com produtos fabricados com o metal. A concentração de crômio em alimentos varia de 0,0005 a 1,3 µg/g, com as maiores concentrações (>0,1 µg/g) encontradas em proteínas animais, cereais, pimenta-do-reino, queijo, e algumas frutas e vegetais (CETESB, 2022). A toxicidade do cromo depende do seu estado de oxidação e da rota de exposição, em alguns casos, mesmo em concentrações muito baixas, na ordem de µg.kg⁻¹, já manifesta sua toxicidade (CALDERON, 2000; KAVCAR, 2009). Quando ingerido ele pode causar efeitos corrosivos no aparelho digestivo e nefrite, sendo sua forma mais tóxica a hexavalente (PIVELE, 2006). Este elemento está incluído entre os que constituem o padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde (BRASIL, 2021). Por esse motivo, são realizados estudos para avaliar e monitorar as concentrações de metais tanto nas águas potáveis que são disponibilizadas para abastecimento da população quanto nos LETAs gerados no durante o processo de potabilização.

Diversas alternativas ambientalmente vantajosas, além de técnica e economicamente viáveis para reutilização de lodo de tratamento de água tem sido frequentemente discutida na literatura (TURNER *et al.*, 2019). Um



exemplo é a recuperação dos seus elementos constituintes (BARAKWAN *et al.*, 2019) e o seu uso como material absorvente para tratar poluentes orgânicos em águas superficiais (ZHOU *et al.*, 2018), além da disposição em aterros sanitários, uso na formação de bio sólido, emprego na construção civil e aplicações industriais diversas (CORNWELL, 1999; BIDONE *et al.*, 2001).

Para que seja possível determinar as melhores oportunidades para o gerenciamento desses lodos, se fazem necessárias caracterizações físico-químicas e microbiológicas (GODOY *et al.*, 2019). Uma das maneiras de identificar os possíveis impactos ambientais da disposição final de LETAs pode ser feita por meio da determinação da sua composição química e em simulações das condições reais da natureza. Para isso, ensaios de solubilização e lixiviação são métodos comuns utilizados para analisar o impacto ambiental da destinação de resíduos em condições semelhantes às naturais. Esses ensaios fornecem informações valiosas sobre a mobilidade e o potencial de contaminação dos elementos presentes nos resíduos, garantindo a gestão ambiental sustentável e a conformidade com regulamentações ambientais.

Consideradas as normas NBR 10.005 e 10.006 (ABNT, 2004) é mister inferir que os extratos lixiviados de resíduos representam as condições ambientais mais severas de interação entre os resíduos e o ambiente, pois propicia a avaliação da resultante de percolação de líquidos ácidos em amostras desagregadas de resíduos, simulando assim liberação a longo prazo de substâncias que podem impactar negativamente o meio ambiente, contaminando solos e recursos hídricos. Tais cenários são representativos de áreas de disposição não controladas de LETAs em ambientes ácidos ou susceptíveis à chuvas ácidas. Os extratos solubilizados são representativos de interações mais controladas, pois parte da premissa de condição estática do material em interação com águas em condição de pH neutro, diluindo as substâncias contidas nos resíduos. Tais condições podem ser verificadas em aterros exclusivos de LETAs ou até mesmo em aplicações de uso benéfico do material.

Apesar das diferentes condições expostas, ambos os resultados obtidos são de extrema importância, auxiliando na prevenção de poluição, podendo assim, se necessário, submeter os resíduos a um pré-tratamento antes da destinação final (CHRISTENSEN *et al.*, 2001; EL FADEL *et al.*, 2002). As discussões relacionadas à representatividade ambiental dos extratos lixiviados e solubilizados se justifica uma vez que essas amostras deixarão de ser avaliadas, a partir do momento em que entrar em vigor a NBR 10.004 atualizada, cuja revisão encontra-se em consulta pública no presente momento.

OBJETIVO

Objetivo Geral

Determinar a presença de Cromo em lodos de estação de tratamento de água e o potencial risco ambiental da sua destinação em solos.

Objetivos específicos

- Avaliar a presença de Cr na composição elementar de amostras de LETAs centrifugados;
- Obter e avaliar extratos lixiviados e solubilizados das amostras de LETAs;
- Determinar o potencial de carreamento do elemento Cr em condições naturais;
- Identificar os potenciais riscos ambientais associados ao Cr, decorrentes da disposição de LETAs em solos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta é uma pesquisa experimental quanti-qualitativa, cujas etapas estão mostradas na Figura 1.

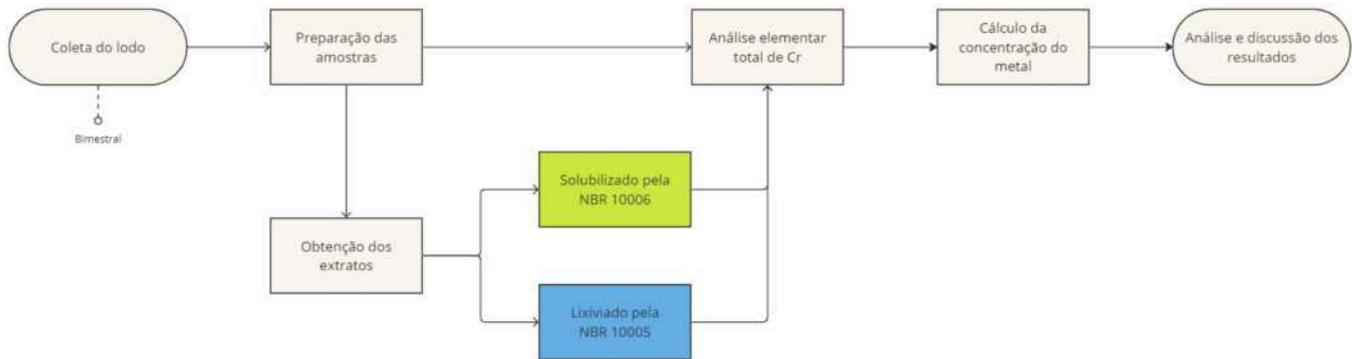


Figura 1. Fluxograma das etapas.

COLETA DO LODO

As amostras dos lodos utilizados neste estudo foram provenientes de uma ETA, localizada no estado de São Paulo, que faz uso de coagulante à base de alumínio. A instalação processa águas de um conjunto de reservatórios e fornece aproximadamente 15 m³/s de água potável para o abastecimento público. A qualidade da água no manancial e as águas potáveis são monitoradas, conforme prevê o padrão de potabilidade brasileiro (BRASIL, 1999), a ETA possui licenciamento ambiental e destina os LETAs gerados para disposição final adequada.

Para a potabilizar a água captada, trata-se de uma ETA convencional que possui operações unitárias de: coagulação (sulfato de alumínio ou policloreto de alumínio), floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e ajuste de pH. O manejo interno dos LETAs ocorre de forma ininterrupta, já que os decantadores são equipados com raspadores para a remoção contínua de resíduos. Após serem extraídos, os LETAs são submetidos ao desagüamento que inclui as seguinte etapas: equalização para homogeneização, adensamento para redução do volume, centrifugação para separação de sólidos e líquidos e, finalmente, secagem (natural ou térmica) para remoção da umidade, resultando em um produto mais estável para descarte ou reutilização (Figura 2).

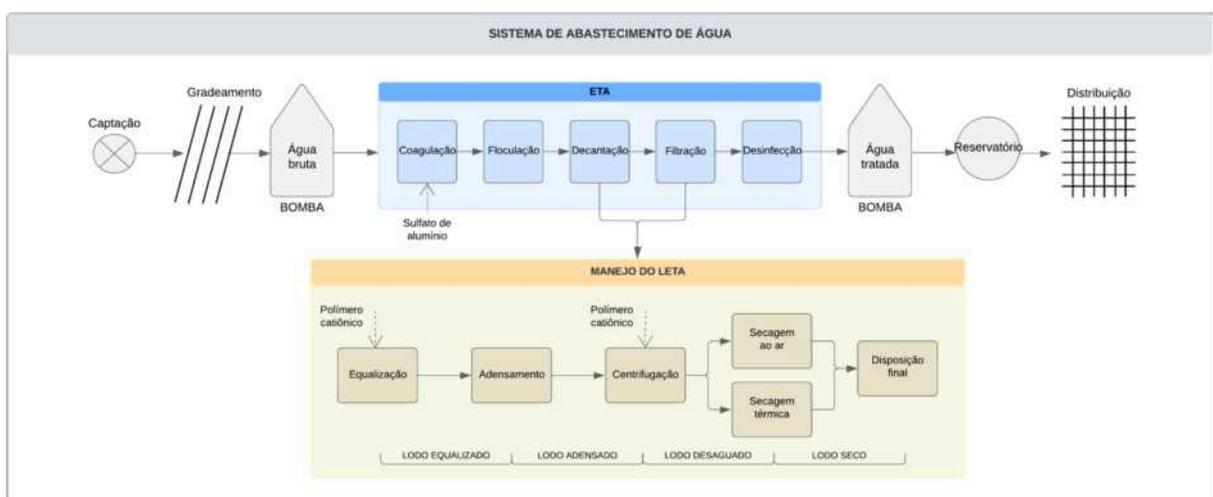


Figura 2. Fluxograma do sistema de abastecimento de água e gerenciamento interno do LETA.

Amostras diárias de 5kg de lodo foram acumuladas ao longo de 60 dias e coletadas bimestralmente, por um período de um ano. Cada uma das seis amostras, representativas do bimestre, foi homogeneizada mecanicamente no local de geração e transferida para bombonas estanques e encaminhadas para laboratório analítico.

PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Parte de cada uma das amostras utilizadas para essa pesquisa, foi pesada, disposta em bandejas para secagem em estufa (42°C), destorroada e peneirada, de maneira intercalada à secagem, na peneira de malha 9,5mm. A sequência descrita foi adotada conforme a seção de preparação da amostra, proposta pela NBR 10006 (ABNT, 2004), com o objetivo de garantir um preparo equivalente às três análises posteriores.

Considerando a elevada fração de água presente no material bruto, de em média 80%, medida via testes de umidade, uma grande quantidade de LETA homogeneizado (4 a 5 kg) foi reservada, de cada amostra, para o processo de secagem e peneiramento (Figura 3).



Figura 3. Preparação da amostra.

A peneiração desempenha um papel significativo no procedimento de preparação de amostras, especialmente devido à sua capacidade em ampliar a superfície de contato do material. Isso não apenas acelera o processo de secagem, mas também assegura a representatividade adequada da amostra e impede a formação de torrões volumosos e densos, otimizando todo o processo. A Figura 4 ilustra o processo de peneiramento de uma das amostras de LETA, demonstrando o estado inicial da amostra, que foi apenas homogeneizado e exposto ao ar; durante o processo de peneiramento, evidenciando a redução dos grãos e, consequentemente, o aumento da área de contato; e após a secagem em estufa, com a amostra pronta para ser utilizada nos experimentos subsequentes.

**ANTES****DURANTE****DEPOIS****Figura 4.** Peneiramento.

Todas as amostras, depois de secas, peneiradas e destorroadas, foram pesadas, nas quantidades recomendadas nas normas vigentes, e reservadas para utilização nos experimentos para obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados, conforme mostrado na Figura 5.

**Figura 5.** Pesagem.

EXTRATO LIXIVIADO

Para obtenção do extrato lixiviado das amostras de LETA, observou-se o disposto na Norma ABNT 10005:2004. O termo lixiviação refere-se à capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas



presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator (ABNT, 2004). Tem como objetivo diferenciar os resíduos perigosos e não perigosos (ABNT, 2004). O experimento segue um processo padrão para garantir a precisão e a consistência dos resultados. O primeiro passo envolve a preparação do material a ser analisado. Para isso, os LETAs foram homogeneizados, secos e peneirados (conforme descrito no tópico de preparação das amostras) de maneira a garantir uma amostragem representativa e de fácil manuseio. Em seguida, foram pesadas as respectivas porções das amostras a serem analisadas e realizada a etapa de escolha da solução de extração, conforme os materiais se comportaram à variação do pH, sendo utilizada para todas as amostras, uma solução de extração composta por ácido acético glacial, NaOH e água.

O extrato lixiviado, por sua vez, foi obtido através de um processo de agitação, onde a mistura de material sólido e a solução de extração, é submetida a condições específicas de rotação e tempo (30 ± 2 rpm por 18 horas). Este processo visa simular as condições ambientais que podem levar à liberação de substâncias químicas perigosas dos resíduos, utilizando um agitador rotatório de frasco para realização do experimento, mostrado na Figura 6.



Figura 6. Extrato Lixiviado.

Após o tempo determinado de extração, os extratos foram filtrados para remover quaisquer partículas sólidas que possam estar presentes, por meio de um aparelho de filtração pressurizada, com filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de $0,7 \mu\text{m}$, estando por fim pronto para posteriores análises (Figura 7).

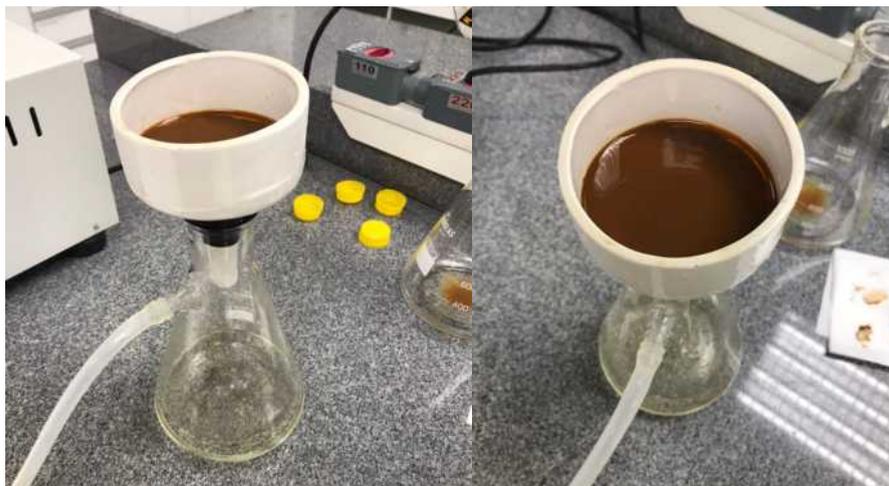


Figura 7. Filtração dos extratos dos LETAs.



EXTRATO SOLUBILIZADO

Para obtenção do extrato solubilizado das amostras de LETA, observou-se o disposto na Norma ABNT 10006:2004. A solubilização é a operação que tem o objetivo de diluir substâncias contidas nos resíduos, por meio de lavagem em meio aquoso. A solubilização dos contaminantes é caracterizada por meio de sua transferência para o meio líquido. Visa diferenciar os resíduos não perigosos não inertes e inertes (ABNT, 2004).

Da mesma maneira que o anterior, o procedimento para obtenção do extrato solubilizado, segue uma série de etapas para garantir resultados precisos e consistentes, sendo a primeira delas, a preparação da amostra, (conforme descrito no tópico de preparação das amostras), para garantir uma amostragem representativa e de fácil manuseio.

Em seguida, porções específicas de cada uma das amostras dos LETAs preparados, foram pesadas e colocadas em béqueres de vidro, completados com água destilada. Os recipientes foram rapidamente homogeneizados, cobertos com filme de PVC e deixados em repouso por uma semana, para permitir a solubilização das substâncias presentes nos resíduos. Esse processo visa simular as condições ambientais que podem determinar se os resíduos reagem ou não - ou seja, se são inertes ou não inertes.



Figura 8. Extrato solubilizado.

Após o tempo necessário para a solubilização, o extrato solubilizado foi filtrado para remover quaisquer partículas sólidas de granulometria não adequada para os ensaios, por meio de um aparelho de filtração pressurizado, com membrana filtrante com 0,45 μm de porosidade, estando finalmente pronto para posteriores análises físico-químicas.



Figura 9. Filtração dos extratos solubilizados.

DETERMINAÇÃO DO CROMO

A determinação de Cromo foi realizada na massa bruta e nos extratos (lixiviados e solubilizados) dos Lodos de Estações de Tratamento de Água (LETAs). Essa é uma etapa crucial na avaliação da qualidade e potencial impacto ambiental desses resíduos. Essa análise segue a norma 6010D da U.S. EPA e foi conduzida por laboratórios credenciados pelo INMETRO, utilizando a técnica por ICP-OES (Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Induzido).

O ICP-OES é uma técnica analítica altamente sensível e precisa, capaz de detectar e quantificar a presença de diversos elementos metálicos em uma amostra. Ele funciona expondo a amostra a um plasma de alta temperatura, que ioniza os átomos dos elementos presentes, permitindo sua identificação e quantificação com base na intensidade das linhas espectrais emitidas (HAM; BRYAN M.; AIHUI MAHAM, 2015).

A comparação entre as concentrações de metais nos extratos e na massa bruta permite avaliar o potencial de contaminação dos LETAs e o risco ambiental associado. Para isso, foi determinada a concentração do contaminante em função: da concentração dos extratos em mg/kg, desconsiderando a diluição dos contaminantes; da massa da amostra usada no ensaio de lixiviação ou solubilização em kg; e da massa do resíduo (lodo) em kg.

Para comparação nas concentrações de Cr entre os extratos lixiviados/solubilizados e a massa bruta, uma conversão da unidade de mg/L para mg/Kg foi necessária (U.S. EPA, 2014), como descrito por Brito e Soares (2008). O resultado em mg/kg foi obtido a partir da concentração do contaminante em mg/L e sua relação com o volume da solução lixiviante usada no ensaio de lixiviação ou solubilização e a massa da amostra (L/kg), como indicado na equação (1):

$$[mg/kg] = mg/L \times L/kg \quad (1)$$

Onde:

$[mg/kg]$: concentração em mg/kg do extrato lixiviado ou solubilizado, considerando a diluição dos contaminantes;

$[mg/L]$: concentração em mg/L do extrato lixiviado ou solubilizado;

$[L/kg]$: relação entre volume do extrato lixiviado ou solubilizado e a massa da amostra usada no ensaio de lixiviação ou solubilização.

Sendo a massa da amostra (m), aquela correspondente utilizada nos ensaios de lixiviação (0,100 kg) ou solubilização (0,250 kg).

Após determinação da concentração dos extratos lixiviado e solubilizado, foi utilizada a Equação 2, para determinar a concentração do contaminante em função: da concentração dos extratos em mg/kg, desconsiderando a diluição dos contaminantes; da massa da amostra usada no ensaio de lixiviação ou solubilização em kg; e da massa do resíduo (lodo) em kg.

$$[X] = \frac{[mg/kg] \times m_{amostra (lix/sol)}}{m_{lodo}} \quad (2)$$

Onde:

$[X]$: concentração do extrato lixiviado/solubilizado desconsiderando a diluição do resíduo no aglomerante (mg/kg);

$[mg/kg]$: concentração do extrato lixiviado ou solubilizado (mg/kg);

$m_{amostra (lix/sol)}$: massa da amostra no ensaio de lixiviação/solubilização (kg);

m_{lodo} : massa do resíduo (kg).

Essa abordagem fornece informações valiosas para o gerenciamento adequado dos LETAs, ajudando a determinar medidas preventivas e corretivas para mitigar os impactos ambientais e proteger a saúde pública. Além disso, a realização dessas análises por laboratórios credenciados assegura a confiabilidade e validade dos resultados obtidos, fornecendo uma base sólida para tomada de decisões e políticas de gestão de resíduos.

RESULTADOS

A Figura 10 apresenta o hidrograma de chuvas do município onde a ETA está instalada. Os dados representam o comportamento da chuva e da temperatura ao longo do ano. São calculados a partir das médias climatológicas de uma série de 30 anos (CLIMATEMPO, 2024). Com ele é possível identificar que a região experimenta uma clara distinção entre os meses chuvosos e de seca, associados aos períodos mais quentes do ano. Durante os meses de outubro a março, caracterizados pelo aumento gradual das temperaturas, é enfrentada a estação chuvosa. Dezembro, janeiro e fevereiro são os meses com precipitações mais intensas, que atingem picos de mais de 200mm. À medida que os meses de abril a setembro se aproximam, ocorre a estação seca, sendo mais expressiva nos meses de junho, julho e agosto.

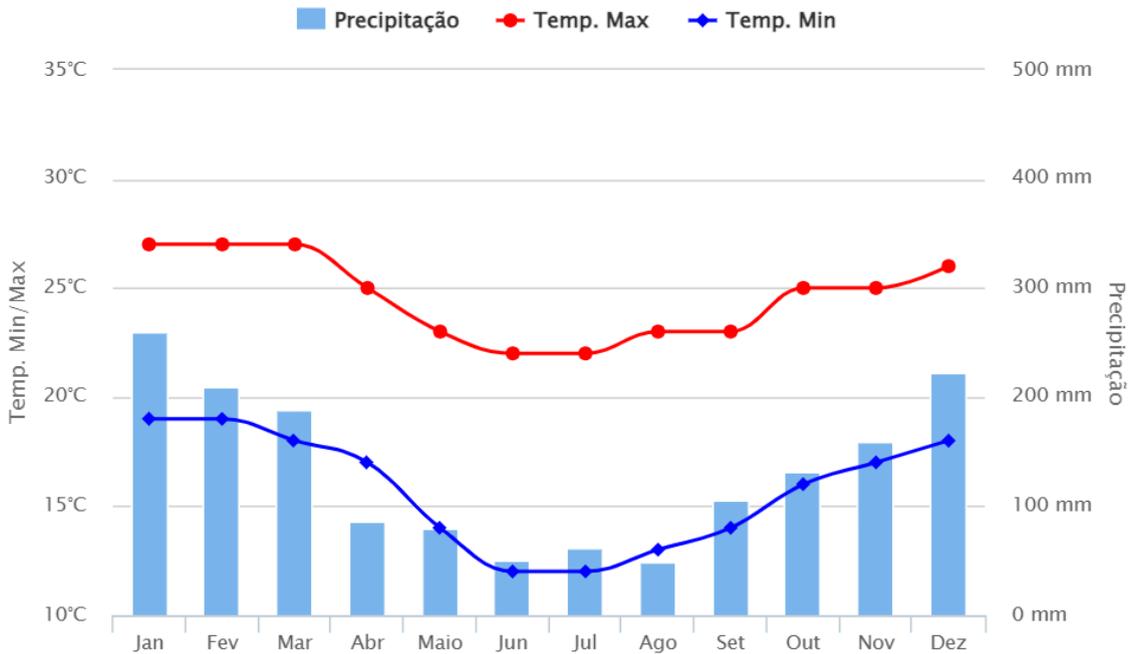


Figura 10. Hidrograma de precipitação no local da estação.
Fonte: CLIMATEMPO, 2024.

As concentrações de cromo total nas amostras de LETAs bruto e nos extratos solubilizados e lixiviados são mostrados na Tabela 1. Os respectivos extratos obtidos podem ser vistos na Figura 11.

Tabela 1. Concentração de cromo total presente em LETA na massa bruta e nos extratos solubilizados e lixiviados.

Coleta bimestral	Massa Bruta (mg/kg)	Extrato Solubilizado (mg/L)	Extrato Lixiviado (mg/L)
Out/Nov	7,0	< 0,0008*	< 0,0008*
Dez/Jan	5,5	< 0,0008*	< 0,0008*
Fev/Mar	6,9	< 0,0008*	< 0,0008*
Abr/Mai	30,0	< 0,0008*	< 0,0008*
Jun/Jul	28,1	< 0,0008*	< 0,025**
Ago/Set	31,5	< 0,0008*	< 0,0008*

*Limite de Detecção = 0,0008 **Limite de Quantificação = 0,025



Figura 11. Extratos lixiviados e solubilizados.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004) não estabelece limites de referência de concentração de cromo em massa bruta de resíduos, apenas para análises de amostras de lixiviados e resíduos solubilizados, que são respectivamente 5,0 mg/L e 0,05mg/L. As concentrações de cromo total presente nos extratos (lixiviado e solubilizado) apresentam valores inferiores às identificadas nas amostras de massa bruta. Isso também foi observado nos estudos por Ackah *et al.* (2018) e Boscov *et al.* (2021) com a evidência de que o metal presente na massa bruta do lodo não se desprende.

A análise da presença desse elemento nos resíduos produzidos é conduzida considerando a possibilidade de eles atuarem como acumuladores de metais, tornando-se assim meios de dispersão do elemento no ambiente. Em resíduos provenientes de ETAs, em geral, a concentração desse elemento é observada em uma faixa de 0,3 a 1,5 mg/kg, valores para os quais não se tem atribuído riscos (PROSAB, 2000; TAVARES, 2003). A Resolução CONAMA N° 420 (2009) aborda os critérios e valores orientadores relativos à qualidade do solo em relação à presença de substâncias químicas. Isso decorre da necessidade de prevenir a contaminação do solo e subsolo para assegurar a funcionalidade dessas áreas e proteger a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Os parâmetros recomendados para o cromo (Cr) são de 75 mg/kg para a prevenção em solos e 50 µg/L para a investigação em águas subterrâneas, alinhado aos padrões de potabilidade para substâncias químicas de risco à saúde, e orientados por Decisão de Diretoria 125/2021/E - Valores Orientadores para água subterrânea (VOR CETESB) (BRASIL, 2021; CETESB, 2021).

Os resultados apresentados evidenciam que a utilização benéfica do LETA pode ser vista como uma oportunidade para aumentar a receita das empresas de saneamento, ao mesmo tempo em que reduz os custos e impactos ambientais associados a esse resíduo. Há diversos estudos abordando alternativas para a disposição ou reutilização desses resíduos, no entanto, ainda existem lacunas no entendimento dos impactos ambientais associados ao seu uso, considerando a variação nas características dos lodo gerados (CORNWELL, 1999; BIDONE *et al.*, 2001; RICHTER, 2001; DI BERNARDO, 2005).

As diferentes concentrações de cromo nos LETAs avaliados nesta pesquisa evidenciam a sazonalidade do elemento associada às condições climáticas da região. Verificou-se que no período seco as concentrações de cromo na composição elementar dos LETAs é significativamente maior do que em períodos chuvosos. Infere-se que o aumento do volume de águas nos mananciais faça a diluição da concentração de cromo presente nos reservatórios. Esses resultados diferem daqueles reportados por DI BERNARDO, 2005; CORDEIRO, 1993;



AZEVEDO NETO *et al.*, 1998; e GALVÃO *et al.*, 2009 que apontam para o aumento da concentração de metais em LETAs em períodos chuvosos, em decorrência do maior arraste de materiais aos corpos d'água. Ainda, levando em consideração o fato de que essa pesquisa realizou uma análise longitudinal em relação a presença do Cr é válido levantar a hipótese de que as composições dos LETAs cujos mananciais possuem reservatórios, podem apresentar comportamento distinto de LETAs cujas águas brutas são captadas à fio d'água. Sendo ainda, o fator mais relevante para o resultado, o comportamento do uso do solo no entorno da captação, isto é, ações antrópicas na bacia, presença de metalurgia, curtume, fertilizantes, decapagem, cromatização, entre outros.

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que o cenário de não desprendimento do Cr presente nos LETAs, em simulações de condições reais na natureza, é favorável à sua aplicação benéfica, sem a ocorrência de potenciais danos à saúde humana e à contaminação ambiental. Dessa forma, as diversas alternativas para disposição e reuso de LETAs são ambientalmente seguras e podem corroborar para a reclassificação do material, a saber: de resíduo para insumo de outros processos produtivos.

A equiparação da composição elementar de elemento químico presente em resíduos e suas manifestações em amostras lixiviadas e solubilizadas podem servir de referenciais para interação desses resíduos em condições ambientais distintas. As amostras lixiviadas, onde ocorre o material desagregado interage em condições ácidas de solos ou águas e permite maior desprendimento potencial de elementos químicos - fato comum em solos argilosos, com baixos valores de pH, ou em meio urbano onde ocorrem chuvas ácidas - são representativas das condições de interação extremas, ou seja - os piores cenários possíveis, que devem ser adotados com vistas ao princípio ambiental da precaução.

Os ensaios de solubilização, no qual os resíduos permanecem por maior período em contato com as águas destiladas e/ou deionizadas, cujo pH é neutro, são representativas das interações ambientais em condições de disposição estáticas e sem agentes potencializadores externos de alteração de pH, e podem representar os impactos ao meio decorrente exclusivamente dos resíduos.

A despeito da ausência de carreamento do cromo para as amostras lixiviadas e solubilizadas, destaca-se a importância da avaliação de outros elementos presentes na composição dos LETAs. Em caso de presença de elementos tóxicos, também se justifica a realização de ensaios de toxicidade, que caracterizam os impactos ao meio ambiente e à saúde humana, assim como o estudo mais detalhado das diferentes espécies de cromo presentes no LETA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACKAH, L.A.; GURU, R.; PEIRAVI, M.; MOHANTY, M.; MA, X.; KUMAR, S.; LIU, J. Characterization of Southern Illinois Water Treatment Residues for Sustainable Applications. *Sustainability* 2018, 10, 1374. <https://doi.org/10.3390/su10051374>
2. AHMED N.K. Natural Radioactivity of Ground and Drinking Water in Some Areas of Upper Egypt. *Turkish J. Eng. Environmental. Science.* 2006.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT. NBR 10004: Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
6. AZEVEDO NETO, J. M.; RICHTER, C. Tratamento de água. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.
7. Barakwan, RA, Hardina, TT, Trihadiningrum, Y., Bagastyo, AY, 2019. Recuperação de alumínio de lodo de tratamento de água de Surabaya usando eletrólise com eletrodos de carbono-prata. *Jornal de Engenharia Ecológica* 20 (7), 126–133. <https://doi.org/10.12911/22998993/109861> .



8. BIDONE, F., SILVA, A. P., MARQUES, D. M. Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitos de Secagem e Codisposição em Aterros Sanitários. Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final / Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001.
9. BOSCOV M. E. G., TSUGAWA J. K., MONTALVAN E. L. T. Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils, Sustainability 2021, 13, 9848. <https://doi.org/10.3390/su13179848>
10. BRADL, HB Metais Pesados no Meio Ambiente; Elsevier: Neubrucke, 2005; 283p.
11. BRASIL. Fundação Nacional de Saúde – Manual de saneamento. 3. Ed. rev. – Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2004.
12. BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021. Brasília, 2021.
13. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, 2004.
14. BRITO, A.L.F; SOARES, S.R. Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação. Artigo técnico, Engenharia Ambiental e Sanitária. Campina Grande, Paraíba, 2008.
15. CALDERON R. L. The Epidemiology of Chemical Contaminants of Drinking Water. Food and Chemical Toxicology 38. 2000.
16. CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. DECISÃO DE DIRETORIA N.º 125/2021/E, DE 09 DE DEZEMBRO DE 2021. Dezembro de 2021.
17. CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Ficha de informação toxicológica. Crômio e seus compostos. Janeiro de 2012 Atualizado em fevereiro de 2022.
18. CHRISTENSEN, T. H.; BJERG, P. P. L.; JENSEN, D. L.; J. B.; CHRISTENSEN, A.; BAUM, A.; ALBRECHTSEN, H-J.; HERON G. Biochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry. Vol. 16, p. 659-718, 2001.
19. CLIMATEMPO. Climatologia e histórico de previsão do tempo. Brasil, 2024.
20. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores para a definição de áreas de preservação permanente. Diário Oficial da União, Brasília, 2009.
21. CORDEIRO, J. S. O problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de água. São Carlos, 341p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1993.
22. CORNWELL, D. A. Water treatment plant residuals. In: AWWA. Water Quality and Treatment. 5ª ed. Denver, USA:AWWA, 1999.
23. DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005.
24. GALVÃO R.C.F.; GOMES J.P.O.; ALMEIDA R.; BERNARDI J.V.E.; BASTOS W.R.; LACERDA L.D. Variação sazonal de elementos traços associados aos sólidos em suspensão no alto rio madeira, Amazônia ocidental. Brasil, 2009.
25. Godoy, L. G. G. de; Rohden, A. B.; Garcez, M. R., Costa, E. B. da; Da Dalt, S., & Andrade, J.J. de O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. Construction and Building Materials, 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.
26. Grandin, S. R.; Alem Sobrinho, P.; Garcia Jr., A. D.; Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, Brasil, 1993.
27. HAM; BRYAN; AIHUI MAHAM. Analytical Chemistry. 1st ed. Wiley, 2015
28. KAVCAR P.; SOFUOGLU A.; SOFUOGLU S.C. A health risk assessment for exposure to trace metals via drinking water ingestion pathway. Int. J. Hyg. Environmental Health. 2009.
29. MAGOSSI, L. R.; BONACELLA, P. H. Poluição das águas. São Paulo: Moderna 2008. ONU. Declaração da “ONU Água” para o Dia Mundial da Água - 2010.
30. ONU. Declaração da “ONU Água” para o Dia Mundial da Água - 2010.
31. PIVELE R., KATO M. Qualidade das águas e poluição: Aspectos físico-químicos. São Paulo; ABES; 2006.
32. PROSAB. Programa de pesquisa em saneamento básico. Rio de Janeiro: ABES, 2000.



33. RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 2001.
34. ROCHA, L.D.M.; Efeito do pH na Lixiviação e Solubilidade de Compostos da Areia Descartada de Fundação e de Agregados de Fresado de Asfalto. Universidade estadual de Ponta Grossa - Setor de Ciências Agrárias e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Ponta Grossa, 2019.
35. SILVA, M. V. da. Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de Estação de Tratamento de Água. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
36. SOUZA, F.R. Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto. 2010. 211 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
37. TAVARES R.G. Problemas operacionais na indústria da água. Consumo excessivo de cloro na linha tronco de distribuição do sistema Gurjaú e lodos gerados pelas 6 maiores estações de tratamento de água da região metropolitana do Recife. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2003.
38. TURNER, T., WHEELER, R., STONE, A., OLIVER, I., 2019. Potenciais vias alternativas de reutilização para resíduos de tratamento de água: barreiras e questões restantes – uma revisão. Água Ar Poluição do Solo. 230, 227. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4272-0>, 2019.
39. U.S. EPA. 2014. "Method 6010D (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry," Revision 4. Washington, DC.
40. ZHOU. Z, YANG. Y., LI, X., LI, P., ZHANG. T., Lv, X., LIU, L., DONG. J., ZHENG. D., 2018. Optimized removal of natural organic matter by ultrasound-assisted coagulation of recycling drinking water treatment sludge. Ultrason. Sonochem. 48, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.022>.