

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

**Um Estudo Sobre o Arsênio: Toxicidade, Liberação para o Meio Ambiente,
Métodos de Tratamento e Sua Relação com a Mineração de Ouro**

Aluno: Pedro Henrique Meireles Fonseca

Orientador: Prof^a. Sônia Denise Ferreira Rocha

Novembro, 2018

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	6
3. DESENVOLVIMENTO	7
3.1. Química do Arsênio	7
3.2. Ocorrência do Arsênio na Natureza	7
3.3. Aplicações do Arsênio	9
3.4. Toxicidade do Arsênio	10
3.4.1. Diretrizes da OMS e Normas Brasileiras de Qualidade da Água	10
3.4.2. Efeitos Adversos na Saúde Humana	10
3.5. Casos de Contaminação ao Redor do Mundo	12
3.5.1. Panorama Geral.....	12
3.5.2. Casos de Contaminação por Fontes Naturais (Geológicas) de Arsênio.....	13
3.5.3. Contaminações como Resultado de Atividades de Mineração.....	14
3.6. Casos de Contaminação por Arsênio no Brasil.....	15
3.7. Liberação de Arsênio para o Meio Ambiente	16
3.7.1. Fontes Naturais e Especiação	16
3.7.2. Relação da Mineração de Ouro com a Liberação de Arsênio	18
3.8. Alternativas para Gestão de Resíduos de Arsênio.....	20
3.8.1. Técnicas para a Remoção de Arsênio da Água	21
3.8.1.1. Métodos de Precipitação Química.....	22
3.8.1.2. Método de Adsorção.....	25
3.8.1.3. Método de Troca Iônica.....	26
3.8.1.4. Método de Filtração por Membranas	27
3.8.1.5. Perspectivas Futuras	28
4. CONCLUSÕES	28
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

RESUMO

Crescente atenção tem sido dada ao arsênio devido aos seus efeitos adversos na saúde humana, especialmente depois do grave episódio de contaminação em massa por esse elemento em Bangladesh e Índia. O consumo de água contaminada é a principal fonte que contribui para o desenvolvimento de doenças relacionadas ao arsênio. A maioria dos casos de contaminação de água ocorre por fontes naturais, porém atividades antropogênicas, em especial a mineração, contribuem com a exacerbação da poluição por arsênio. A mineração de ouro, que é um elemento encontrado comumente associado ao arsênio, é capaz de liberá-lo para o meio ambiente. A presente monografia identificou que há escassez de relatos ao redor do mundo sobre os impactos severos do arsênio na saúde humana como resultado da mineração. Mesmo assim, é imprescindível para a indústria da mineração entender os mecanismos de liberação do arsênio para o meio ambiente e empregar as tecnologias mais eficientes para tratá-lo, a fim de evitar problemas ambientais e de saúde pública. Dentre as tecnologias disponíveis, métodos de precipitação/coprecipitação são os mais frequentemente aplicados pela indústria no tratamento de efluentes contaminados com arsênio.

Palavras-chave: arsênio, contaminação, mobilização, mineração, ouro, tecnologias de tratamento, coprecipitação.

ABSTRACT

Increasing attention has been drawn to the adverse health effects of arsenic exposure, especially after the severe mass poisoning of local populations by this element in Bangladesh and India. The consumption of arsenic contaminated water is the major pathway that contributes to the development of arsenic-related diseases. Most cases of contamination of water occur naturally; however, anthropogenic sources, especially mining, can exacerbate the problem of arsenic contamination. The mining of gold, which is an element found commonly associated with arsenic, is capable of releasing arsenic to the environment. The present study identified that, surprisingly, there are almost no reports of severe arsenic impacts on human health as a result of mining. Nevertheless, it is vital for the mining industry to understand the mechanisms of arsenic release to the environment and employ the most effective technologies to treat it in order to avoid environmental and public health problems. Among the available technologies, precipitation/coprecipitation methods are the most frequently employed by the industry at present to treat arsenic-contaminated effluents.

Keywords: Arsenic. Contamination. Mobilization. Mining. Gold. Treatment Technologies. Coprecipitation.

1. INTRODUÇÃO

O ouro é um metal que desperta o fascínio da humanidade desde as mais antigas civilizações até os dias de hoje. Extremamente valorizado pela indústria joalheira, o ouro atualmente também é essencial para a indústria de alta tecnologia, além de ainda servir como reserva de ativo financeiro.

Associado às mineralizações de ouro, comumente se encontra o elemento químico arsênio. Diferentemente do ouro, que desperta interesse por suas propriedades físicas e químicas desejáveis, o arsênio atrai atenção pelo fato de que seus compostos apresentam toxicidade aguda para o ser humano, sendo que a exposição crônica ao arsênio pode causar problemas de saúde substanciais.

A principal rota de exposição ao arsênio se dá através do consumo de água contaminada por esse elemento. A contaminação da água potável por arsênio pode ocorrer de forma natural por características da geologia local, em especial pela liberação de arsênio através de processos de intemperismo e lixiviação. Entretanto, atividades antropogênicas, normalmente associadas à mineração, podem exacerbar a poluição por arsênio, por expor os minerais que contêm esse elemento ao oxigênio atmosférico e água.

Atualmente, existe uma série de tecnologias disponíveis para a remoção viável do arsênio de soluções aquosas até um nível seguro de concentração para o consumo humano. As tecnologias mais adotadas para a redução dos níveis de arsênio na água estão relacionadas a métodos que levam à precipitação química desse elemento e posterior disposição do precipitado contendo arsênio.

A exposição ao arsênio continua sendo um problema de saúde pública que afeta diversas pessoas ao redor do mundo. Preocupados com essa situação, órgãos ambientais e de saúde vêm sugerindo critérios cada vez mais restritivos quanto à concentração de arsênio na água potável ao longo dos anos. Considerando esse cenário, a mineração do ouro, uma atividade que notoriamente contribui com a liberação de arsênio, deve estar ciente dos perigos que o arsênio posa para a população e fazer todos os esforços possíveis no sentido de minimizar a liberação do arsênio para o meio ambiente.

2. OBJETIVOS

O objetivo dessa monografia é apresentar, através de uma revisão bibliográfica, um estudo sobre o arsênio e como a mineração, em especial a de ouro se relaciona a esse elemento. Buscou-se entender as propriedades do arsênio, como ele é liberado para o meio ambiente, a relação da mineração com essas liberações, os efeitos do arsênio na saúde humana e quais são as tecnologias usadas para o tratamento e remoção de arsênio do meio aquoso.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Química do Arsênio

O arsênio é um elemento químico de símbolo As pertencente ao grupo 15 (ou grupo do nitrogênio) da tabela periódica. O seu número atômico é 33, massa atômica 75 u. e apresenta configuração eletrônica $[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p^3$.

Muitas vezes referido como um metal pesado, o arsênio é na verdade um metaloide, ou seja, apresenta propriedades intermediárias entre os metais e os não-metais.

O arsênio é naturalmente encontrado nos estados de oxidação -3, 0, +3 e +5. Entretanto, os estados de oxidação -3 e 0 são raros e o arsênio é mais comumente encontrado na natureza nas valências +3 e +5 (GARELICK *et al.*, 2008).

3.2. Ocorrência do Arsênio na Natureza

O arsênio é o 20° elemento mais comum na crosta terrestre, o 14° na água do mar e o 12° no corpo humano (MANDAL & SUZUKI, 2002). No meio ambiente, o arsênio normalmente é encontrado combinado com outros elementos nas formas orgânica e inorgânica.

A espécie orgânica é predominantemente encontrada em frutos do mar, como em mariscos (US EPA, 2000). Taylor *et al.* (2016) expõem que atualmente ainda existem poucos dados para que sejam feitas análises da toxicidade e riscos da exposição humana ao As orgânico e que costuma-se considerar o As orgânico como não-tóxico. Tendo em vista esse nicho bastante restrito de exposição ao As orgânico, a escassez de estudos sobre o assunto e a falta de relação dessa espécie com a mineração, a presente monografia não contemplará posteriores detalhamentos sobre o As orgânico.

A espécie inorgânica, por sua vez, ocorre naturalmente em mais de 200 minerais, dos quais aproximadamente 60% são arsenatos, 20% sulfetos e sulfosais e os restantes 20% incluem arsenetos, arsenitos, óxidos, silicatos e arsênio nativo (As). O mais comum deles é a arsenopirita (MANDAL & SUZUKI, 2002). Os minerais de maior ocorrência podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1- Principais minerais de arsênio e ocorrências. Fonte: Adaptado de Mandal e Suzuki (2002).

Mineral	Composição
Arsênio nativo	As
Proustita	Ag ₃ AsS ₃
Rammelsbergita	NiAs ₂
Safflorita	(Co,Fe)As ₂
Seligmannita	PbCuAsS ₃
Esmaltita	CoAs ₂
Nicolita	NiAs
Realgar	AsS
Orpimento	As ₂ S ₃
Cobaltita	CoAsS
Arsenopirita	FeAsS
Tennantita	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃
Enargita	Cu ₃ AsS ₄
Arsenolita	As ₂ O ₃
Claudetita	As ₂ O ₃
Scorodita	FeAsO ₄ ·2H ₂ O
Annabergita	(Ni,Co) ₃ (AsO ₄) ₂ ·8H ₂ O
Hoernesita	Mg ₃ (AsO ₄) ₂ ·8H ₂ O
Haematolita	(Mn,Mg) ₄ Al(AsO ₄) (OH) ₈
Conicalcita	CaCu(AsO ₄)(OH)
Adamita	Zn ₂ (OH)(AsO ₄)
Domeykita	Cu ₃ As
Loellingita	FeAs ₂
Farmacosiderita	Fe ₃ (AsO ₄) ₂ (OH) ₃ ·5H ₂ O

3.3. Aplicações do Arsênio

A demanda por arsênio na sua forma elementar é limitada, sendo que cerca de 95% do arsênio comercializado é na forma combinada, principalmente como trióxido de arsênio (As_2O_3) (ATSDR, 2007). China e Marrocos lideram a produção de trióxido de arsênio, sendo responsáveis por 88% da produção mundial estimada (USGS, 2018).

No passado, o arsênio era usado predominantemente como pesticida na forma de compostos inorgânicos. Atualmente, os compostos inorgânicos não podem ser mais utilizados na agricultura, entretanto, compostos orgânicos continuaram sendo usados como pesticidas, principalmente no cultivo do algodão (ATSDR, 2007). Gannon e Polizzotto (2016) apontam que desde 2006, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency – US EPA, em inglês) faz esforços para eliminar progressivamente o uso de todos os pesticidas contendo arsênio orgânico; entretanto, o metilarsenato monossódico (MSMA, em inglês) ainda é usado com algumas restrições.

Atualmente, a produção de arsênio é dedicada à fabricação de pesticidas, com compostos orgânicos, e preservativos de madeira que representam 50% e 30% da demanda, respectivamente. O preservativo de madeira mais empregado é o arseniato de cobre cromatado (CCA). O restante do arsênio é empregado na fabricação de vidro, ligas metálicas, eletrônicos, catalisadores, aditivo em forragem animal e na medicina veterinária (GARELICK *et al.*, 2008).

O arsênio metálico de alta pureza (99,9999%) é usado para produzir semicondutores de arsenieto de gálio (GaAs) com aplicações em células solares, investigação espacial e telecomunicações (USGS, 2018).

As duas únicas áreas que viram um crescimento no uso de arsênio ao longo dos últimos anos foram na produção de preservativos de madeira, principal uso do trióxido de arsênio, e na indústria de eletrônicos com o uso do arsênio de alta pureza na produção de semicondutores. Em todas as outras, o uso do arsênio apresenta decréscimo contínuo (LEIST, CASEY & CARIDI, 2000).

Não foram encontrados dados de produção e consumo de arsênio no Brasil em fontes oficiais.

3.4. Toxicidade do Arsênio

3.4.1. Diretrizes da OMS e Normas Brasileiras de Qualidade da Água

Órgãos reguladores têm sido cada vez restritivos quanto ao arsênio devido à ameaça que ele posa para a saúde humana. Leist, Casey e Caridi (2000) apontam que a Organização Mundial da Saúde (OMS) revisou as suas diretrizes para o arsênio na água potável de 50 para 10 µg/L em 1993.

Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental US EPA adotou esse novo padrão em 2001, passando o limite de concentração do arsênio na água potável de 50 para 10 µg/L (ATSDR, 2007). No Brasil, atualmente, 10 µg/L também é o limite da concentração de arsênio para atender os padrões de potabilidade da água ditados pela Portaria nº 2.914, de 12 dezembro de 2011 do Ministério da Saúde.

Já em relação ao lançamento de efluentes, que é um assunto pertinente à mineração, a Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, define 0,5 mg/L como o limite de arsênio para lançamentos em cursos d'água.

3.4.2. Efeitos Adversos na Saúde Humana

Além da exposição profissional, a principal forma de exposição ao arsênio é através da ingestão de alimentos e água. Em regiões onde a concentração de arsênio na água potável supera 10 µg/L, essa será a principal fonte de ingestão de arsênio (WHO, 2017). A exposição ao arsênio através da água potável é a fonte de exposição que mais preocupa em escala global e é a mais estudada.

O arsênio é conhecido como um veneno para o ser humano desde tempos antigos. A maioria dos compostos de arsênio são brancos ou incolores, inodoros e costumam não apresentar gosto particular ao paladar. Portanto, normalmente é impossível identificar se há presença de arsênio na comida, água ou ar (ATSDR, 2007), o que o torna um contaminante ainda mais perigoso.

A maioria dos casos de intoxicação do ser humano por arsênio são devidos à exposição ao As inorgânico. Os efeitos na saúde humana dos óxidos e oxiácidos mais

comuns do arsênio são extensamente documentados. A arsina (AsH_3) é a forma química mais tóxica, seguida pelos arsenitos (AsO_3^{3-}) que tendem a ser um pouco mais tóxicos que os arsenatos (AsO_4^{3-}). Entretanto, a arsina, mesmo sendo uma espécie extremamente tóxica, não costuma estar presente em concentrações preocupantes nas principais formas de exposição ao arsênio, uma vez que ela e seus derivados são gases ou líquidos voláteis (ATSDR, 2007).

Os efeitos da ingestão crônica de arsênio aparecem lentamente (SMITH, LINGAS & RAHMAN, 2000). Um dos efeitos mais característicos da exposição ao arsênio em longo prazo são as alterações na pele (ATSDR, 2007). As lesões de pele podem incluir mudanças de pigmentação, principalmente na parte superior do tórax, braços e pernas, e queratose nas palmas das mãos e nas solas dos pés (SMITH, LINGAS & RAHMAN, 2000). Um exemplo de lesão na pele é mostrado na Figura 1.



Figura 1 - Lesão de pele devido ao envenenamento por arsênio. Fonte: Smith, Lingas e Rahman (2000).

Também existem evidências suficientes para relacionar o arsênio ao desenvolvimento de alguns tipos de câncer em humanos. A Agência Internacional para Pesquisa em Câncer (*International Agency for Research on Cancer – IARC*, em inglês), que faz parte da OMS, classifica os compostos inorgânicos de arsênio como pertencentes ao Grupo 1 (carcinogênico para humanos) (WHO, 2017).

Alguns dos efeitos de longo prazo na saúde humana citados por Smith, Lingas e Rahman (2000) incluem: lesões na pele, câncer de pele, câncer em órgãos internos como na bexiga, rins e pulmão, efeitos neurológicos, hipertensão e doenças cardiovasculares, doenças pulmonares, doença vascular periférica e diabetes.

3.5. Casos de Contaminação ao Redor do Mundo

3.5.1. Panorama Geral

Apesar da exposição ao arsênio ser possível a partir de diversas fontes como ar, água, comida e solo, há fortes evidências que o consumo de água contaminada seja a via que mais contribui com o desenvolvimento de doenças relacionadas à exposição ao arsênio (GARELICK & JONES, 2008). Há, também, indícios de que a maioria das províncias com altos teores de arsênio nas águas subterrâneas resultam da ocorrência natural de arsênio (MANDAL & SUZUKI, 2002).

Garelick e Jones (2008), através do mapa apresentado na Figura 2, evidenciam que o risco de exposição crônica ao arsênio é um problema global, uma vez que há casos de contaminação distribuídos pelo mundo todo. O mapa ainda evidencia que a exposição é mais frequente através de aquíferos naturalmente contaminados por arsênio. A segunda fonte de contaminação mais dominante é antropogênica e está relacionada à mineração. Outra forma natural de exposição, menos frequente, é através de águas geotérmicas. A contaminação pela queima de carvão foi considerada restrita a uma localidade apenas, em Guizhou, na China.

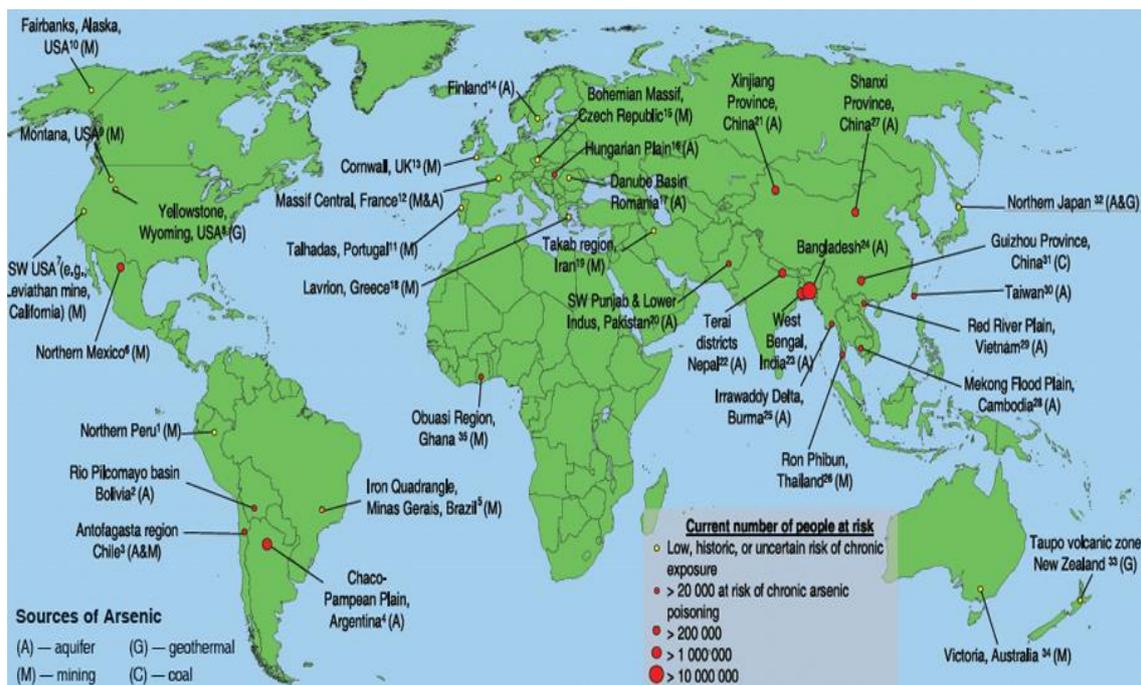


Figura 2 - Contaminação por arsênio ao redor do mundo, mostrando a fonte de contaminação e número de pessoas em risco de exposição crônica. Fonte: Garelick e Jones (2008).

3.5.2. Casos de Contaminação por Fontes Naturais (Geológicas) de Arsênio

A situação mais grave de contaminação de águas subterrâneas por arsênio é em Bangladesh. O incidente é considerado o maior caso de intoxicação de uma população em toda a história, expondo milhões de pessoas ao arsênio (SMITH, LINGAS & RAHMAN, 2000).

A história desse incidente teve início durante os anos 70 quando a UNICEF trabalhou junto ao governo de Bangladesh para construir poços tubulares para fornecer água potável à população como forma de combater a alta taxa de mortalidade a partir de doenças gastrointestinais, uma vez que a água superficial era imprópria para o consumo. Porém, na época, a água desses poços não foi testada para arsênio, uma vez que o elemento não era reconhecido como problemático no fornecimento de água. A contaminação dos poços foi confirmada anos depois, em 1993. Quando da confirmação da contaminação dos poços, estimou-se que o número de pessoas bebendo água

contaminada com teores acima do limite recomendado para o arsênio estaria na casa das dezenas de milhões (SMITH, LINGAS & RAHMAN, 2000).

A água subterrânea responsável pela contaminação em massa em Bangladesh é proveniente da Bacia de Bengala, uma região que compreende mais de 2% da população mundial. Além de Bangladesh, também é preocupante a situação em Bengala Ocidental, estado da Índia que faz fronteira com Bangladesh, onde a população também utilizou água subterrânea contaminada com arsênio dessa mesma bacia ao longo de muitos anos (CHAKRABORTY, MUKHERJEE & AHMED, 2015). Em Bengala Ocidental, o número de pessoas expostas ao arsênio foi estimado em 1,5 milhões (SMITH, LINGAS e RAHMAN, 2000).

Contaminações endêmicas similares a partir de água subterrânea usada para consumo também foram documentadas na China, Taiwan, Nepal e Vietnã (GARELICK *et al.*, 2008).

Contaminações naturais também podem ocorrer quando fluidos geotérmicos ricos em arsênio entram em contato com águas superficiais. Regiões geotermicamente ativas como o Parque Nacional de Yellowstone nos Estados Unidos e a Zona Vulcânica de Taupo na Nova Zelândia são exemplos de onde ocorre esse tipo de contaminação.

3.5.3. Contaminações como Resultado de Atividades de Mineração

Garellick *et al.* (2008) fazem um apanhado de casos ao redor do mundo onde altas concentrações de arsênio em solos, sedimentos e água foram associadas à mineração. São reportados casos em todos os continentes, incluindo países como os Estados Unidos, Canadá, México, Brasil, Chile, África do Sul, Zimbábue, Gana, Irã, Índia, Tailândia, Inglaterra, Grécia e Austrália.

Entretanto, mesmo que contaminações severas ao meio ambiente já tenham sido documentadas em diversos distritos mineiros ao redor do mundo, é surpreendente que, com exceção do caso da Tailândia, pouco ou nenhum impacto na saúde da população local foi reportado (GARELICK *et al.*, 2008).

Na Tailândia, o envenenamento a partir da liberação de arsênio para o meio ambiente em função de atividades de mineração é bem documentado. Aproximadamente 1.000 pessoas na região Sul da Tailândia foram diagnosticadas com

problemas de pele relacionados ao arsênio. Como resultado da mineração de estanho na região, concentrações de até 5.000 mg/L foram encontradas em lençóis freáticos poucos profundos (GARELICK *et al.*, 2008).

3.6. Casos de Contaminação por Arsênio no Brasil

Segundo Borba, Figueiredo e Angélica (2007), estudos integrados sobre contaminação de arsênio foram conduzidos somente em três áreas no Brasil, indicadas na Figura 3. São elas: (1) Quadrilátero Ferrífero, onde grandes quantidades de As foram liberadas como resultado da mineração de ouro nos três séculos passados; (2) Vale do Ribeira, na região sudeste do país, onde pequenas quantidades de As foram liberadas como subproduto da mineração de Pb-Zn durante o século passado, onde também o As ocorre naturalmente em rochas e solos ricos nesse elemento; (3) Região de Santana, no estado do Amapá, onde o As é associado a minérios de manganês extraídos nos últimos 50 anos.

Borba, Figueiredo e Angélica (2007), ao discutirem dados existentes sobre a distribuição do arsênio no Brasil, concluem que, apesar da ação antropogênica ter exacerbado a ocorrência natural do arsênio nas três regiões de estudo levando a contaminações severas de sedimentos de rio, apenas pequenas concentrações foram encontradas em águas superficiais utilizadas para consumo. Nenhum caso de efeito adverso à saúde relacionado à contaminação por arsênio através do consumo de água foi identificado no Brasil pelos autores.

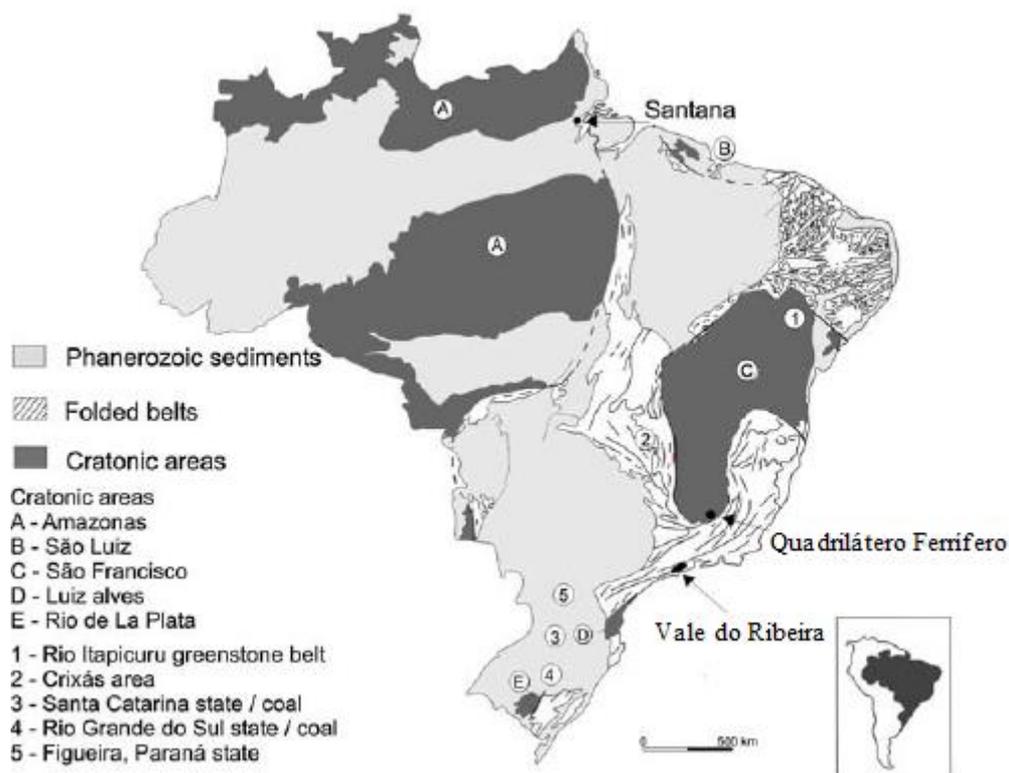


Figura 3 - Mapa geológico simplificado do Brasil com a localização das três áreas onde houve estudos integrados sobre o arsênio. Fonte: Adaptado de Borba, Figueiredo e Angélica (2007).

Mesmo que a situação do Brasil em relação ao arsênio não represente um caso preocupante de saúde pública no momento, é preciso tirar lições sobre casos catastróficos como o de Bangladesh e frequentemente monitorar a qualidade da água consumida pela população, especialmente porque diversos municípios ainda dependem da água superficial não tratada para consumo. Além disso, seria importante também realizar um extenso mapeamento geoquímico do arsênio no país e alertar a população sobre os perigos da exposição ao arsênio em áreas de alta concentração desse elemento.

3.7. Liberação de Arsênio para o Meio Ambiente

3.7.1. Fontes Naturais e Especiação

A liberação do arsênio para o meio ambiente pode ocorrer naturalmente através do intemperismo, oxidação e erosão de minerais sulfetados dependendo do ambiente geológico em questão. Esses minerais sulfetados podem formar solos com altas concentrações de arsênio, e o arsênio ainda pode ser dissolvido pela água (SME, 2015). Atividades vulcânicas são outra fonte geológica natural de liberação de arsênio (NICOMEL *et al.*, 2015).

As fontes mais comuns de contaminação da água subterrânea em escala global são os sulfetos de arsênio, pirita rica em arsênio e óxi-hidróxidos de ferro ricos em arsênio. Estudos sugerem que os principais mecanismos associados à liberação de arsênio em águas subterrâneas derivam da dissolução de minerais sulfetados contendo arsênio, dessorção a partir de óxidos de ferro ricos em arsênio ou dissolução redutiva de óxidos de ferro ricos em arsênio (GARELICK *et al.*, 2008).

Em águas naturais, o arsênio se encontra presente na forma de compostos inorgânicos solúveis. Os compostos arsenicais que prevalecem na água são geralmente encontrados em dois estados de valência química: como arsenito (As^{III}) e arsenato (As^{V}) (LANGSCH *et al.*, 2012).

A especiação do arsênio na água tem relação com o pH e potencial redox. A Figura 4 mostra um diagrama Eh-pH para as espécies de arsênio num sistema As-O₂-H₂O à temperatura de 25 °C e pressão total de 101.3 kPa (NICOMEL *et al.*, 2015).

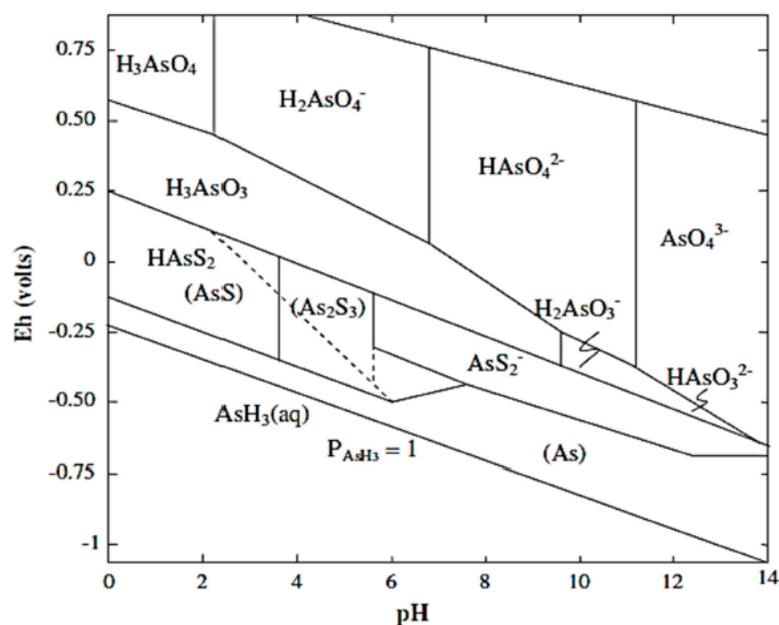


Figura 4 - Diagrama Eh-pH para o arsênio a 25°C e 101,3 kPa. Fonte: Nicomel *et al.* (2015)

Segundo Nicomel *et al.* (2015), em ambientes aquosos redutores, como em águas de subsuperfície, o arsênio existe principalmente como arsenito, enquanto o arsenato prevalece em ambientes oxidantes, como no caso de águas superficiais. Além disso, Langsch *et al.* (2012) apontam que, em condições de pH normais da água natural

(6 a 8), o arsenato é encontrado em duas formas iônicas: H_2AsO_4^- e HAsO_4^{2-} , enquanto a única forma abundante de arsenito é a neutra: H_3AsO_3 . Essas asserções podem ser observadas através do diagrama da Figura 4.

Entender a especiação do arsênio é muito importante uma vez que o seu estado de oxidação tem relação com a sua toxicidade; o As(III) é considerado mais danoso para o organismo humano que o As(V). Além disso, técnicas para a remoção de arsênio levam em conta a sua especiação, uma vez que, os arsenatos, que se encontram em espécies negativamente carregadas (H_2AsO_4^- e HAsO_4^{2-}) geralmente são mais simples de serem removidos que a forma neutra do arsenito (H_3AsO_3) (NICOMEL *et al.*, 2015).

3.7.2. Relação da Mineração de Ouro com a Liberação de Arsênio

Além das causas naturais, segundo Garelick *et al.* (2008), quantidades significativas de arsênio também são introduzidas no meio ambiente através de atividades antropogênicas, dentre as quais a mineração e a metalurgia são as principais fontes.

Componente natural em minérios de chumbo, zinco, cobre e ouro (GARELICK *et al.*, 2008), o arsênio é mobilizado em grandes quantidades pela mineração através de atividades como escavações, transporte de minério, fundição, refino e a disposição de rejeitos sólidos e efluentes (LANGSCH *et al.*, 2012). A mineração aumenta a taxa com que o arsênio é liberado dos minerais sulfetados ao expor esses minerais à atmosfera e aos processos de intemperismo (SME, 2015).

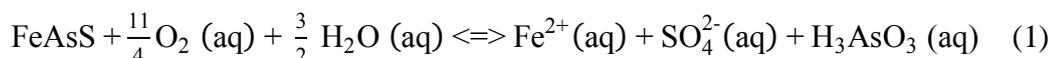
A liberação de altas concentrações de arsênio através da mineração pode ocorrer a partir da geração de estéreis e rejeitos contendo minerais sulfetados durante a extração e beneficiamento mineral (MORIN & CALAS, 2006). Isso se explica porque a exposição do material geológico sulfetado ao oxigênio atmosférico e à água, combinada a uma série de reações químicas, eletroquímicas e microbiológicas, gera o fenômeno da drenagem ácida de mina (DAM) que leva a um cenário de acidificação da água de drenagem e aumenta a solubilidade e lixiviação de elementos tóxicos como metais pesados e metaloides (ANDRADE *et al.*, 2008).

Lugares onde ocorrem a extração e fundição de sulfetos são locais potenciais de contaminação futura por arsênio (GARELICK *et al.*, 2008). A mineração de ouro,

frequentemente associada a mineralizações sulfetadas, portanto, é capaz de induzir ou exarcebar localmente a contaminação por arsênio (CHAKRABORTI *et al.*, 2013).

Tomando-se como exemplo a oxidação da arsenopirita (FeAsS), o principal sulfeto de arsênio e que é comumente encontrado em minas de ouro, haverá produção de oxiácidos de arsênio e enxofre como H_3AsO_3 , H_3AsO_4 e H_2SO_4 . Como consequência, o arsênio é liberado para o meio aquoso e há diminuição do pH da água. A taxa de oxidação dos sulfetos depende de uma série de fatores, incluindo a quantidade do mineral sulfetado, distribuição granulométrica, temperatura e tempo de exposição do material ao oxigênio atmosférico e água. Atividade bacteriana, como a do *Acidithiobacillus ferrooxidans*, também é capaz de agravar o problema ao agir como catalisador das reações em meio ácido, a um $\text{pH} < 3$, que estimula a atividade bacteriana (ANDRADE *et al.*, 2008).

Morin e Calas (2006) descrevem esse processo de oxidação e dissolução de sulfetos como sendo governado pela seguinte equação global em duas fases:



A reação de oxidação do sulfeto (Equação 1) pode ser catalizada diretamente por atividade bacteriana e indiretamente pelo íon Fe^{3+} resultante da oxidação do Fe^{2+} por bactérias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*. A oxidação bacteriana do Fe^{2+} dissolvido também leva à formação de vários óxidos de ferro e hidroxí-sulfatos de ferro. A oxidação do arsenito (Equação 2) é lenta, especialmente em meio ácido, mas pode ser catalizada pela atividade de bactérias como *Thiomonas sp.* (MORIN & CALAS, 2006).

A lixiviação do ouro com uso de cianeto, uma das tecnologias empregadas pela indústria do ouro para recuperar o metal valioso, também pode ser responsável por exacerbar a ocorrência natural de arsênio no meio ambiente. Ao contrário do ouro, o arsênio não forma complexos com o cianeto, porém ele apresenta alta solubilidade quando submetido às condições alcalinas usadas durante a cianetação. Portanto, a água usada nesse processo deve ser tratada para remover o arsênio dissolvido antes de ser enviada para as instalações de gestão de rejeitos (HAMBERG *et al.*, 2016).

Garelick *et al.* (2008) afirmam que atividades de mineração de ouro já foram reconhecidas como sendo a principal fonte de poluição de arsênio em algumas localidades como no estado de Victoria, Austrália; Quadrilátero Ferrífero, Brasil; região de Takab, Irã; região norte do Chile; região de Ashanti, Gana; Fairbanks no estado do Alasca, EUA.

A relação entre o ouro e arsênio em depósitos sulfetados é tão característica ao ponto de que na fase de exploração mineral algumas empresas costumam procurar solos e águas com elevados teores naturais de arsênio como forma de localizar um corpo mineral que contenha ouro (SME, 2015).

Tendo em vista a associação do ouro com arsênio, a existência de registros da contribuição da indústria de ouro como fonte poluente de arsênio e a ameaça que o arsênio representa para a saúde humana, é necessário que as empresas estejam sempre buscando aplicar as melhores tecnologias para minimizar a liberação desse elemento.

3.8. Alternativas para Gestão de Resíduos de Arsênio

O arsênio é um elemento que não pode ser destruído no meio-ambiente, ele só pode ser convertido em diferentes formas ou transformado em compostos insolúveis ao ser combinado com outros elementos, como o ferro (LEIST, CASEY & CARIDI, 2000). Portanto, é preciso buscar formas seguras e permanentes para a disposição de resíduos de arsênio de modo que eles não se tornem uma ameaça futura para a saúde humana ou para o meio ambiente.

O tratamento desses resíduos é um desafio para a indústria mínero-metalúrgica em termos de custo e segurança. Uma vez que a demanda por arsênio é limitada, ele não é uma commodity de interesse. Além disso, ainda há a preocupação com o armazenamento do arsênio na forma concentrada e as consequências desastrosas em um eventual acidente (LEIST, CASEY & CARIDI, 2000). Portanto, atualmente, há pouco incentivo para concentrar o arsênio. Sendo assim, o que as indústrias têm buscado é uma forma de descartar os rejeitos da maneira mais ecologicamente segura possível.

Encontram-se na literatura diversas tecnologias que foram historicamente usadas para tratar o arsênio. Leist, Casey e Caridi (2000) apontam o encapsulamento do arsênio como a solução mais atrativa para satisfazer a necessidade de uma disposição de longo

prazo ou definitiva. Também conhecida como solidificação/estabilização ou fixação, essa tecnologia tem como objetivo transformar resíduos sólidos ou líquidos potencialmente perigosos em sólidos menos perigosos ou não perigosos. O encapsulamento, que normalmente ocorre em uma matriz de cimento, deve atender aos critérios regulatórios de lixiviabilidade para que, posteriormente, o sólido possa ser disposto em aterros.

Com relação à situação de aplicação, a US EPA, identificou a solidificação/estabilização como a tecnologia mais frequentemente usada para o tratamento de arsênio em solos e resíduos sólidos (US EPA, 2002). O relatório salienta que os dados disponíveis sobre tratamento de rejeitos e efluentes industriais eram limitados, portanto os resultados podem não refletir as tendências na indústria.

Entretanto, segundo Leist, Casey e Caridi (2000), apesar da solidificação/estabilização ser uma técnica já consagrada para tratar de vários elementos tóxicos, ela ainda não é um processo bem definido para os rejeitos de arsênio e necessita de investigações mais sistemáticas. Outra desvantagem dessa tecnologia apontada pelos autores diz respeito ao fato de que, devido à complexidade química do arsênio, o sucesso do processo de tratamento é extremamente dependente da natureza do resíduo de arsênio e não somente da sua concentração.

Especificamente em relação à remoção de arsênio de solução aquosas, como é o caso de efluentes da mineração, a técnica de solidificação/estabilização aparenta não ser procedimento padrão. O principal motivo aparenta ser de natureza econômica, uma vez que essa técnica não é considerada economicamente viável para a gestão de grandes volumes de resíduos (DOERFELT *et al.*, 2015). A presente revisão não encontrou informações sobre o atual estado de aplicabilidade dessa tecnologia para o tratamento industrial de efluentes contaminados com arsênio.

Maiores detalhamentos sobre as técnicas utilizadas para a remoção de arsênio em meio aquoso e perspectivas futuras serão apresentadas, a seguir, no subitem 3.8.1.

3.8.1. Técnicas para a Remoção de Arsênio da Água

Existem diversos métodos para remover o arsênio de soluções aquosas. A partir da revisão da literatura, em especial os estudos de Rosengrant e Fargo (1990); Leist,

Casey e Caridi (2000); US EPA (2002); Cunha e Duarte (2008); Langsch *et al.* (2012) e Nicomel *et al.* (2015), optou-se por separar os métodos de remoção em quatro categorias tendo em vista a frequência com que os mesmos são mencionados na literatura e a aplicabilidade histórica que eles têm. As tecnologias mais convencionais que merecem destaque foram separadas nas seguintes categorias:

- Precipitação química;
- Adsorção;
- Troca iônica;
- Filtração por membranas.

Porém, normalmente não se atinge a remoção desejada somente com a aplicação de um desses processos de remoção. Comumente, usam-se duas ou mais tecnologias combinadas para que a remoção de arsênio da água seja eficiente.

Uma sequência de processos comum inclui um estágio prévio de oxidação para transformar o arsenito (As^{III}) em arsenato (As^{V}), seguido de precipitação do contaminante e filtração para remover os sólidos formados (US EPA 2002).

A oxidação prévia faz-se necessária uma vez que o arsenito é encontrado predominantemente como espécie neutra em pH abaixo de 9,2. Portanto, isso faz com que a forma trivalente do arsênio fique menos disponível para remoção através de métodos como precipitação, adsorção e de troca iônica, ou seja, apresenta remoção mais complexa que o arsenato (NICOMEL *et al.*, 2015). Segundo Viraraghavan *et al.* (1999), conforme citado por Cunha e Duarte (2008), a eficiência de remoção do arsenato é sempre superior à do arsenito.

Uma descrição mais detalhada sobre cada um dos quatros métodos supracitados é fornecida nos subitens seguintes.

3.8.1.1. Métodos de Precipitação Química

O termo “precipitação química” é utilizado no presente trabalho de forma abrangente para tratar dos métodos que têm como premissa remover o arsênio dissolvido pela sua transformação em um sólido insolúvel.

É comum encontrar na literatura nomenclaturas diferentes para se referir aos métodos de precipitação química. O termo coprecipitação é comumente associado a esse método, uma vez que ele pode incluir também o mecanismo de adsorção do arsênio em outra espécie que é precipitada. Frequentemente, o termo coagulação também é usado, pois a precipitação pode ocorrer mediante adição de um coagulante.

A precipitação química é uma tecnologia consagrada no tratamento de resíduos de arsênio. A U.S. EPA reconhece desde 1990 a precipitação química como a melhor tecnologia disponível - BDAT (*Best Available Demonstrated Technology*) - para tratar efluentes contaminados com arsênio (ROSENGRANT & FARGO, 1990).

Essa tecnologia ainda mostra-se relevante atualmente. Langsch *et al.* (2012) consideram os processos de tratamento utilizando coprecipitação com espécies férricas (Fe^{III}) como estado da arte – tecnologia usada industrialmente no presente. Os autores ainda apontam que a precipitação com sais de ferro trivalente e cal – CaO ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – é a técnica comumente aplicada a efluentes da mineração. Em geral, a coprecipitação com excesso de íons férricos a uma razão molar $\text{Fe}^{\text{III}} / \text{As}^{\text{V}}$ maior que três fornece uma remoção efetiva de arsênio em condições até levemente alcalinas de pH (DE KLERK *et al.*, 2015).

A tecnologia normalmente envolve ajuste de pH e adição de um agente químico precipitante ou coagulante; também pode ser que haja a necessidade de adição de um agente oxidante. A oxidação do arsênio para o seu estado As^{V} aumenta a eficiência do processo de precipitação/coprecipitação (US EPA 2002). Um modelo esquemático de um sistema de precipitação/coprecipitação está exemplificado na Figura 5.

Comparada a outras tecnologias, a precipitação/coprecipitação tem como uma das vantagens o fato de que a sua efetividade é menos provável de ser afetada por contaminantes que não o arsênio. Outro fator positivo, é que ela é um método capaz de tratar também características e contaminantes diferentes do arsênio, como dureza e metais pesados (US EPA 2002).

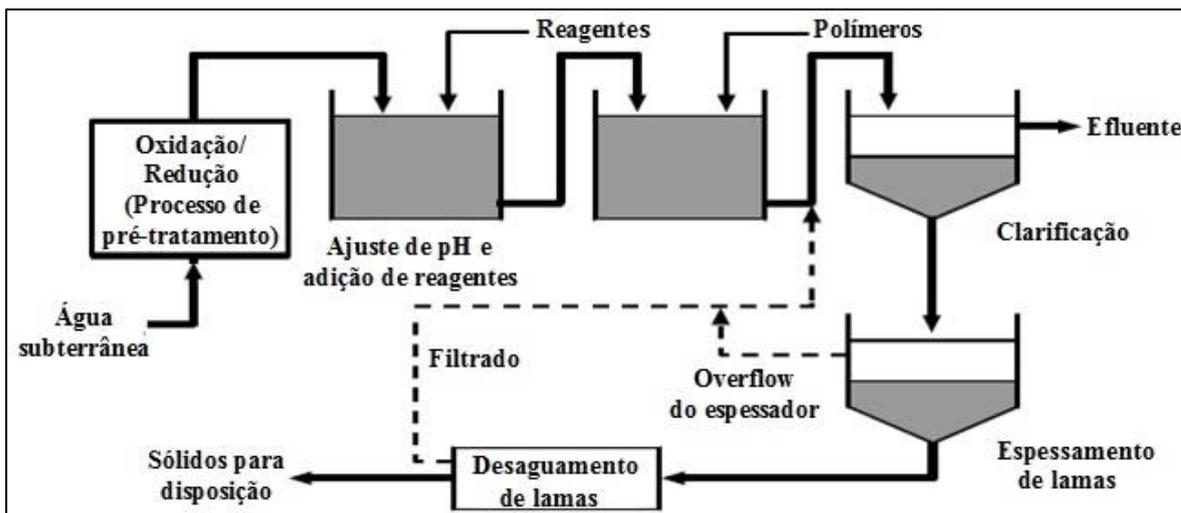


Figura 5 – Modelo de um sistema de precipitação/coprecipitação. Fonte: adaptado de US EPA (2002).

A desvantagem do método de precipitação/coprecipitação é a geração de uma lama residual, que tipicamente requer tratamento e cuidados especiais na sua disposição, o que incorre em custos adicionais (US EPA 2002).

Outro grande problema do método é a questão da estabilidade do precipitado produzido, que pode em algum momento ser liberado de volta para o meio. Doerfelt *et al.* (2015) apontam que a presença de certos elementos na descarga do rejeito de arsênio pode ter efeitos benéficos (como Ca, Ni ou Al) ou deletérios (como a sílica) na estabilidade do rejeito. Além disso, em soluções óxicas, o precipitado é considerado estável; entretanto, em condições sub-óxicas ou anóxicas, a estabilidade do precipitado pode ser comprometida. Condições redutoras podem se desenvolver nas instalações de tratamento de rejeitos e ameaçar a remediação do arsênio, visto que o precipitado férrico pode ser submetido a reações de dissolução redutiva. (DOERFELT *et al.*, 2015).

Doerfelt *et al.* (2015) investigaram o potencial papel estabilizador do ferro ferroso (Fe^{II}) na remoção/retenção de arsênio, uma alternativa interessante tendo em vista que os íons coprecipitantes ferrosos já estão reduzidos e teriam potencial para estabilizar o arsênio em ambientes redutores. Através de resultados experimentais, os autores concluem que a coprecipitação com ferro ferroso a uma razão molar $\text{Fe}^{\text{II}} / \text{As}^{\text{V}}$ igual a 4 é uma forma efetiva para remover o arsênio (V), com resultados comparáveis aos da coprecipitação com ferro férrico, com remoção de arsênio (V) acima de 99,99%.

Os autores também concluem que os coprecipitados de $\text{Fe}^{\text{II}}/\text{Fe}^{\text{III}}/\text{As}^{\text{V}}$ são robustos contra a exposição incidental a agentes redutores.

3.8.1.2. Método de Adsorção

A adsorção é um método comumente usado para tratar águas subterrâneas e água potável (US EPA, 2002). O método de adsorção aqui descrito diz respeito à remoção de arsênio via passagem de água contaminada por colunas de adsorção de leito fixo, como pode ser observado na Figura 6. Quando o meio adsorvente fica saturado, ele deve ser regenerado ou descartado e trocado por um novo, o que é um problema, já que maiores volumes de sólido contaminado podem ser gerados.

Nicomel *et al.* (2015) indicam que esse processo é conduzido principalmente por forças de van de Waals e forças eletrostáticas entre o adsorvato e a superfície do material adsorvente.

Cunha e Duarte (2008) citam o emprego de materiais adsorventes com alumina ativada, carvão ativado e hidróxido de ferro granular como técnicas convencionais eficientes de remoção de arsênio. A alumina ativada é o adsorvente mais comumente usado para remover o arsênio da água potável (US EPA, 2002). Nicomel *et al.* (2015) apontam que a adsorção com base em ferro é uma técnica emergente para o tratamento de água contaminada com arsênio, que se sustenta na grande afinidade que as espécies inorgânicas de arsênio têm com o ferro.

O método de adsorção tem como vantagens: operação e manuseio simples, custo-benefício e ausência de produção de lamas. A principal desvantagem é que a presença de outros contaminantes pode gerar competição com o arsênio por superfícies de adsorção (NICOMEL *et al.*, 2015), além da necessidade de dispor o sólido saturado se este não puder ser regenerado.

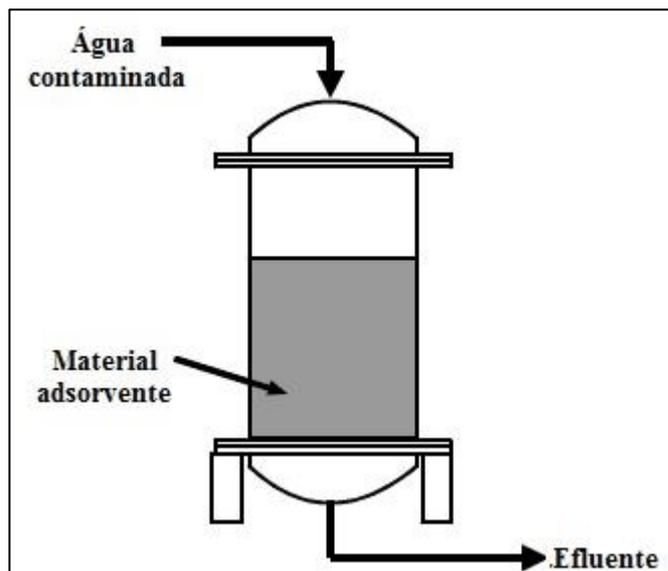


Figura 6 – Modelo de um sistema de adsorção. Fonte: adaptado de US EPA (2002).

3.8.1.3. Método de Troca Iônica

O método de troca iônica é um método geralmente aplicado no tratamento de águas subterrâneas, águas superficiais e água potável. A tecnologia é descrita como um processo físico/químico no qual íons retidos eletrostaticamente na superfície de um sólido são trocados por íons de carga similar em solução (US EPA, 2002).

No tratamento de águas contaminadas com arsênio, o meio utilizado para troca iônica é tipicamente uma resina aniônica de base forte, uma vez que o arsênio dissolvido é usualmente encontrado na forma aniônica. Ao passar a água contaminada por essas resinas, os íons contaminantes de arsênio são trocados por outros íons da resina (US EPA, 2002). O modelo esquemático do processo é equivalente ao de adsorção da Figura 6, trocando-se somente o material adsorvente por uma resina de troca iônica.

As desvantagens do método estão na diminuição da eficiência pela presença de íons que competem pela troca iônica e pela necessidade de um pré-tratamento para remover matéria orgânica, sólidos suspensos e outros contaminantes que podem se incrustar na resina (US EPA, 2002).

3.8.1.4. Método de Filtração por Membranas

O método de filtração por membranas tem como essência a separação de contaminantes presentes na água pela sua passagem por uma membrana semipermeável. Essa membrana é capaz de permitir a passagem de alguns constituintes da água ao mesmo tempo em que barra outros (US EPA, 2002). Um modelo de um sistema de filtração por membrana é apresentado na Figura 7.

Tipicamente as membranas são materiais sintéticos com bilhões de poros que agem como barreiras seletivas. Uma força motriz, como uma diferença de pressão entre a alimentação e o permeado, é necessária para transportar a água através da membrana (NICOMEL *et al.*, 2015).

Existem quatro tipos de processos de membrana que funcionam por diferença de pressão: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR). MF e UF são processos de baixa pressão e, sozinhos, não conseguem tratar eficientemente águas contaminadas com arsênio devido aos seus poros serem grandes. Os processos de alta pressão NF e OR são mais eficientes na remoção de arsênio da água (NICOMEL *et al.*, 2015).

Uma desvantagem desse método é a sensibilidade às características da água e contaminantes presentes nela. A presença de certos constituintes na água de alimentação pode causar entupimento das membranas (US EPA, 2002). Cunha e Duarte (2008) também apontam que, comparado a outros métodos, a utilização de membranas na remoção de arsênio em estações de tratamento de água aumenta expressivamente o custo unitário desse processo.

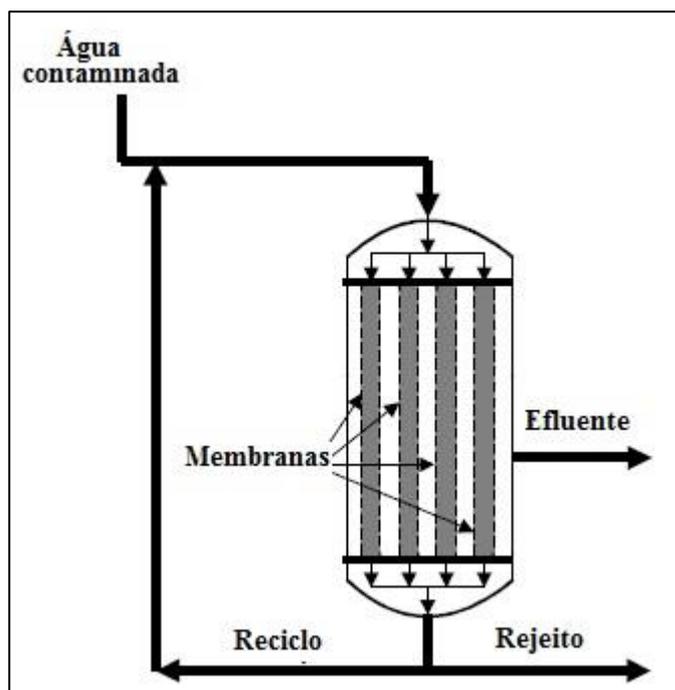


Figura 7 – Modelo de um sistema de filtração por membrana. Fonte: adaptado de US EPA (2002).

3.8.1.5. Perspectivas Futuras

Diversos estudos têm sido feitos para propor o uso de novos materiais como adsorventes para aumentar a eficiência dos mecanismos de adsorção com objetivo de remover o arsênio do meio aquoso. Segundo Nicomel *et al.* (2015), duas classes de materiais têm sido investigadas e ganhado atenção em pesquisas pela potencial capacidade de adsorver contaminantes: nanopartículas e materiais porosos conhecidos como *Metal-Organic Frameworks* (MOFs). Entretanto, não há informação no estudo dos autores sobre a existência de aplicações industriais dessas duas classes emergentes de materiais.

4. CONCLUSÕES

Através da revisão bibliográfica apresentada, conclui-se que o arsênio é um elemento que merece atenção devido aos perigos que ele posa à saúde humana. A principal via de contaminação é oral, através do consumo de água contaminada.

Como apontado durante o estudo, a presença de arsênio no território brasileiro aparenta não ser extensamente investigada. Isso é grave, uma vez que boa parte da população brasileira não tem acesso a redes de abastecimento de água potável e, como o

caso de Bangladesh pode ensinar, a contaminação da água por arsênio é silenciosa e pode ser catastrófica.

A liberação do arsênio pode ocorrer de forma natural ou ser induzida por atividades humanas, principalmente pela mineração. A liberação de arsênio pela mineração está comumente associada à movimentação de minerais sulfetados, portanto, a mineração de ouro, frequentemente associada a mineralizações sulfetadas, é reconhecida como potencial contribuinte para a contaminação por arsênio.

A literatura estudada fornece evidências de que os casos mais graves de contaminação estão relacionados a processos naturais, ao passo que há poucos casos graves de contaminação como resultado das atividades mineiras. Entretanto, não foram encontrados dados suficientes para apontar se a quase não existência de casos de contaminação relacionados à mineração significa que a mineração tem sido eficiente em tratar os rejeitos arsenicais, ou se a população simplesmente tem consumido outras fontes de água mais seguras.

Pouca informação sobre o tratamento de resíduos industriais de arsênio, como é o caso da mineração, é disponibilizada pela própria indústria. Porém, há indicações de que a mineração trate seus efluentes contaminados com arsênio preferencialmente com métodos de precipitação/coprecipitação com espécies férricas. Entretanto, apesar de ser uma tecnologia consagrada, considerada BDAT pela U.S. EPA desde 1990, esse método ainda apresenta algumas desvantagens, especialmente por gerar grande volume de resíduos sólidos ricos em arsênio que podem se desestabilizar e posteriormente liberar o arsênio novamente para o meio.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for Arsenic. Atlanta, GA, ago. 2007.
- Andrade, R.P.; Filho, S.S., Mello, J.W.V; Figueiredo, B.R.; Dussin, T.M. Arsenic Mobilization from Sulfidic Materials from Gold Mines in Minas Gerais State. *Química Nova*, v. 31, n. 5, p. 1127-1130, 2008.
- Chakraborti, D.; Rahmana, M.M.; Murrill, M.; Das, R.; Siddayya; Patil S.G.; Sarkar, A.; Dadapeer, H.J.; Yendigeri, S.; Ahmed, R.; Das, K.K. Environmental arsenic contamination and its health effects in a historic goldmining area of the Mangalur greenstone belt of Northeastern Karnataka, India. *Journal of Hazardous Materials*, v. 262, p. 1048-1055, nov. 2013.
- Chakraborty, M; Mukherjee, A; Ahmed, K.M. A Review of Groundwater Arsenic in the Bengal Basin, Bangladesh and India: from Source to Sink. *Current Pollution Reports*, v. 1, n. 4, p. 220-247, dez 2015.
- Cunha, P.D.R.; Duarte, A.A.L.S. Remoção de arsénio em águas para consume humano. In: *Actas do 13º Encontro Nacional de Saneamento Básico*. Lisboa, 2008.
- De Klerk, R.J.; Feldmann, T.; Daenzer, R.; Demopoulos G.P. Continuous circuit coprecipitation of arsenic(v) with ferric iron by lime neutralization: The effect of circuit staging, co-ions and equilibration ph on long-term arsenic retention. *Hydrometallurgy*, v. 151, p. 42-50, jan. 2015.
- Doerfelt, C. ; Feldmann, T.; Daenzer, R.; Demopoulos G.P. Stability of continuously produced Fe(II)/Fe(III)/As(V) co-precipitates under periodic exposure to reducing agents. *Chemosphere*, v. 138, p. 239-246, nov. 2015.
- Figueiredo, B.R.; Borba, R.P.; Angélica, R.S. Arsenic Occurrence in Brazil and Human Exposure. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 29, n. 2, p. 109-118, abr. 2007.
- Gannon, T.W.; Polizzotto, M.L. MSMA: Knowledge Gaps to Aid Appropriate Regulation of an Efficacious Herbicide. *Agricultural and Environmental Letters*, out. 2016.
- Garelick, H.; Jones, H. Mitigating Arsenic Pollution: Bridging the Gap Between Knowledge and Practice. *Chemistry International*, v. 30, n. 4, jul-

ago 2018. Disponível em: http://www.iupac.org/publications/ci/2008/3004/2_garelick.html Acesso em 18 de Novembro 2018)

- Garelick, H.; Jones, H.; Dybowska, A.; Valsami-Jones, E. Arsenic Pollution Sources. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology; International Perspectives on Arsenic Pollution and Remediation. New York: Springer Publishing, 2008. v. 197, p. 17-60.
- Hamberg, R.; Bark, G.; Maurice, C.; Alakangas, L. Release of Arsenic from Cyanidation Tailings. Minerals Engineering, v. 93, p. 57–64, jul. 2016.
- Langsch, J.E.; Costa, M.; Moore, L.; Morais, P.; Bellezza, A.; Falcão, S. New Technology for Arsenic Removal from Mining Effluents. Journal of Materials Research and Technology, v. 1, n. 3, p. 178-181, dez. 2012.
- Leist, M; Casey R.J; Caridi, D. The Management of Arsenic Wastes: Problems and Prospects. Journal of Hazardous Materials, v. 76, p. 125-138, ago. 2000.
- Mandal, B.K.; Suzuki, K.T. Arsenic round the World: A Review. Talanta, v. 58, p. 201-235, ago. 2002.
- Morin, G.; Calas, G. Arsenic in Soils, Mine Tailings, and Former Industrial Sites. Elements Magazine, v. 2, n. 2, p. 97-101, abr. 2006.
- Nicomel, N.R; Leus, K.; Folens, K.; Van Der Voort P.; Du Laing G. Technologies for Arsenic Removal from Water: Current Status and Future Perspectives. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 13, n. 1, p. 62, dez. 2015.
- Rosengrant, L.; Fargo, L. Final best demonstrated available technology (BDAT) background document for K031, K084, K101, K102, As wastes (D004), Se wastes (D010), and P and U wastes containing As and Se listing constituents. Wash. DC, p.124, 1990.
- SME, 2015. The Role of Arsenic in the Mining Industry, abr. 2015. Disponível em : <http://me.smenet.org/docs/Publications/ME/Issue/TheRoleofArsenicintheTheRoleofArsen.pdf> Acesso em 18 de Novembro 2018.

- Smith, A.H.; Lingas, E.O.; Rahman, M. Contamination of Drinking-Water by Arsenic in Bangladesh: A Public Health Emergency. *Bulletin of World Health Organization*, v. 78, n. 9, p. 1093–1103, set. 2000.
- Taylor, V.; Goodale, B.; Raab, A.; Schwerdtle, T.; Reimer, K.; Conklin, S.; Karagas M.R; Francesconi, K.A. Human exposure to organic arsenic species from seafood. *Science of the Total Environment*, v. 580, p. 266–282, fev. 2017.
- U.S. Geological Survey (USGS). *Mineral commodity summaries 2018: U.S. Geological Survey*. Reston, Virginia, jan. 2018.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency), 2002. *Arsenic Treatment Technologies for Soil, Waste, and Water*. Solid Waste and Emergency Response EPA-542-R-02-004.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency), 2000. *Technologies and Costs for Removal of Arsenic from Drinking Water*, EPA 815R00028, Prepared by Malcolm Pirnie, Inc. under contract 68C60039 for EPA ORD, dez. 2000.
- WHO, 2017. *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: World Health Organization; 2017. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.