





- Pesca (lazer)  Retirada de areia  
 Nado ou outras atividades esportivas  Atividades domésticas  
 Uso de barco ou outras embarcações (transporte)  Uso religioso  
 Não utilizava o corpo d'água (rio) para nenhuma atividade  Não soube informar  
 Outros (Qual? \_\_\_\_\_)  Não respondeu

27) O que era feito com o peixe pescado antes do rompimento da barragem?

- Consumo local  Venda em cooperativas/mercados  
 Venda para vizinhos/conhecidos  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)  
 Não soube informar  Não respondeu

28) Quais as espécies de peixes pescados **antes** do rompimento da barragem

---

29) **Antes** do rompimento da barragem, o(a) sr(a) ou outros trabalhadores deste local plantavam vegetais, como verduras, legumes, frutas, grãos, raízes neste estabelecimento?

**(Caso a resposta seja negativa, pular para questão 32)**

- Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

O(a) sr(a) pode me falar o que era plantado neste estabelecimento?

---

30) **Antes** do rompimento da barragem, para que eram plantados os vegetais neste estabelecimento, como verduras, legumes, frutas, grãos, raízes?

- Consumo local  Venda em cooperativas/mercados  
 Venda para vizinhos/conhecidos  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)  
 Não soube informar  Não respondeu

31) **Antes** do rompimento da barragem, de onde vinha a água que era utilizada para irrigar as plantas ou árvores neste estabelecimento?

- rio \_\_\_\_\_  Nascente  
 outro rio, córrego, lagoa (Qual? \_\_\_\_\_)

Caminhão-pipa

Concessionária de abastecimento  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Poço na propriedade  Não soube informar  Não respondeu

32) Antes do rompimento da barragem, havia criação animal como vacas, galinhas, peixes, abelhas e outros neste estabelecimento? **(Caso a resposta seja negativa, pular para questão 35)**

5

Simbologia das alternativas:  – independentes  – excludentes



Sim       Não       Não soube informar       Não respondeu

Em caso positivo quais eram os animais criados no local?

---

---

33) **Antes** do rompimento da barragem, quais eram os produtos de origem animal produzidos neste estabelecimento?

- Leite e derivados       Ovo  
 Carne       Outro (Qual? \_\_\_\_\_)  
 Não soube informar       Não respondeu

34) **Antes** do rompimento da barragem, o que era feito com os produtos animais produzidos neste estabelecimento?

- Consumo dos funcionários       Venda em cooperativas/mercados  
 Venda para vizinhos/conhecidos       Outro (Qual? \_\_\_\_\_)  
 Não soube informar       Não respondeu

**Após o rompimento da barragem:**

35) Desde o rompimento da barragem, este estabelecimento utiliza a água do(a) \_\_\_\_\_ para quais dessas atividades? **(Entrevistador: inserir o nome do corpo/curso d'água afetado dentro da área alvo. Marcar com um "X", com exceção de a resposta ser "Outro", onde há necessidade de informar sobre o que se refere. Caso as respostas "Pesca (econômica)" ou "Pesca (lazer)" não tenham sido indicadas, pular para questão 37)**

Nome do corpo d'água: \_\_\_\_\_

- Pesca (econômica)       Uso de barco ou outras embarcações (lazer)  
 Pesca (lazer)       Retirada de areia  
 Nado ou outras atividades esportivas       Atividades domésticas  
 Uso de barco ou outras embarcações (transporte)       Uso religioso  
 Não utiliza o corpo d'água (rio) para nenhuma atividade       Não soube informar  
 Outros (Qual? \_\_\_\_\_)       Não respondeu

36) Desde o rompimento da barragem, o que é feito com o peixe pescado?

- Consumo local       Venda em cooperativas/mercados  
 Venda para vizinhos/conhecidos       Outro (Qual? \_\_\_\_\_)  
 Não soube informar       Não respondeu

Desde o rompimento da barragem, quais espécies de peixes são pescadas?

---

Simbologia das alternativas:

– independentes

– excludentes

6



41) Em caso positivo da resposta anterior, quais são os animais criados neste estabelecimento?

Bovinos  Galináceos

Caprinos  Equinos

Suínos  Outros (Quais? \_\_\_\_\_)

Não soube informar  Não respondeu

42) Desde o rompimento da barragem, quais são os produtos animais produzidos neste estabelecimento?

Leite e derivados  Ovo

Carne  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Não soube informar  Não respondeu

43) Desde o rompimento da barragem, o que é feito com os produtos animais produzidos neste estabelecimento?

Consumo dos funcionários  Venda em cooperativas/mercados

Venda para vizinhos/conhecidos  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Não soube informar  Não respondeu

44) Desde o rompimento da barragem, de onde vem a água que os animais criados neste estabelecimento bebem?

rio \_\_\_\_\_  Nascente

outro rio, córrego, lagoa (Qual? \_\_\_\_\_)

Caminhão-Pipa

Concessionária de abastecimento  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Poço na propriedade  Não soube informar  Não respondeu

**Poeira:**

45) Desde o rompimento da barragem, o(a) sr(a) acha que a poeira do ambiente aumentou?

Aumentou muito, se comparado a antes do rompimento

Aumentou pouco, se comparado a antes do rompimento

Permanece igual, se comparado a antes do rompimento

Diminuiu, se comparado a antes do rompimento

Não soube informar  Não respondeu

Em caso positivo de aumento, consegue descrever as características desta poeira (cor, se é “pegajosa/oleosa” ou não etc.)?

8

Simbologia das alternativas:  – independentes

– excludentes



**Abastecimento de água:**

**Antes do rompimento da barragem:**

46) Antes do rompimento da barragem, de onde vinha a água utilizada por este estabelecimento?

rio \_\_\_\_\_

outro rio, córrego, lagoa (Qual? \_\_\_\_\_)

Poço cacimba

Profundidade \_\_\_\_\_

+ adicionar poços

Nascente

Concessionária de abastecimento de água

Compra / recebe galão de água mineral?  Sim  Não. (Se sim, Quantos? \_\_\_\_\_)

Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Não soube informar

Não respondeu

**Após do rompimento da barragem:**

47) Desde o rompimento da barragem, de onde vem a água utilizada por este estabelecimento?

rio \_\_\_\_\_

outro rio, córrego, lagoa (Qual? \_\_\_\_\_)

Poço cacimba

Profundidade [   ]

+ adicionar poços

Nascente

Concessionária de abastecimento de água

Compra / recebe galão de água mineral?  Sim (Quantos? \_\_\_\_\_)  Não

Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Não soube informar

Não respondeu







54) O rompimento da barragem alterou algo em sua vida? **(Entrevistador: pular a próxima questão se a resposta for negativa)**

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

55) Pode falar como foi afetado pelo rompimento da barragem?

---



---



---



---

**(Entrevistador: Caso tenha sido feita uma síntese da resposta do entrevistado, releia de volta ao mesmo e pergunte se concorda ou se necessita de complementação)**

**Preocupações com a saúde:**

56) Desde o rompimento da barragem, o(a) sr(a) acha que as preocupações com a saúde das pessoas que **trabalham** neste estabelecimento aumentaram, reduziram ou continuaram a mesma?

Aumentaram  Reduziram  Continuaram a mesma

Não soube informar  Não respondeu

57) Desde o rompimento da barragem, o(a) sr(a) observou piora nos problemas de saúde ou novos problemas de saúde entre as pessoas que **trabalham** neste estabelecimento?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Caso positivo, quais? \_\_\_\_\_

---

58) Após o rompimento da barragem, comparado ao que era antes, a saúde das pessoas que **trabalham** neste estabelecimento **ficou?** **(Marcar com um "X" a opção selecionada, havendo a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)**

Saúde atual	Entrevistado	Trabalhador 1	Trabalhador 2	Trabalhador 3	Trabalhador 4	Trabalhador 5
Muito melhor depois do que antes do rompimento						
Um pouco melhor depois do que antes do rompimento						
Igual estava antes do rompimento						
Um pouco pior depois do que antes do rompimento						
Muito pior depois do que antes do rompimento						

11

Simbologia das alternativas: { } – independentes

[ ] – excludentes





## QUESTIONÁRIO RESIDENCIAL

### Localização:

Município/Localidade: \_\_\_\_\_

Comunidade: \_\_\_\_\_

Ponto de Referência: \_\_\_\_\_

Coordenada Norte (Y): \_\_\_\_\_

Coordenada Leste (X): \_\_\_\_\_

Permissão para fotografar a área/fachada da residência:

Autorizado       Não autorizado       Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Nome do aplicador do questionário: \_\_\_\_\_

Data de aplicação do questionário: \_\_\_\_\_

### Informações do entrevistado e demais moradores da propriedade:

1) Qual o seu nome (entrevistado)? \_\_\_\_\_

2) Quantas pessoas moram nesta casa?

1 morador       2 moradores       3 moradores       4 moradores

5 moradores       6 moradores       Mais de 6 moradores (Quantos? \_\_\_\_\_)

3) Alguma mulher que mora nesta casa está grávida?

Sim (Quanto tempo de gestação \_\_\_\_\_ (SEMANAS / MESES )

Não

4) Alguma mulher que mora nesta casa está amamentando?

Sim (Quantas? [     ])

Não

5) Se sim, a amamentação é exclusiva, ou seja, o bebê só toma o leite materno?

Sim;

Não, o bebê também é alimentado fórmula;

Não, o bebê também é alimentado com outros tipos de leite ou outros alimentos

6) Há quanto tempo a família mora nesta casa? \_\_\_\_\_

7) No total, qual é a renda mensal dos moradores desta casa? (Obs.: Incluir o rendimento somado de todos os moradores da casa)

Menos de R\$ 500,00

Simbologia das alternativas:      { } – independentes      [ ] – excludentes



- Entre R\$ 500,00 e R\$ 1.000,00,
- Entre R\$ 1.000,00 e R\$ 2.000,00
- Entre R\$ 2.000,00 e R\$ 3.000,00
- Entre R\$ 3.000,00 e R\$ 4.000,00
- Mais de R\$ 4.000,00
- Não respondeu
- Não soube informar

Simbologia das alternativas:

{ } – independentes

[ ] – excludentes



8) O(a) Sr(a) pode fornecer as informações abaixo sobre si e os outros moradores da propriedade (local da entrevista)?

	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Nome	-----					
Grau parentesco com o entrevistado	-----					
Sexo (M, F, outro)						
Situação com relação à moradia*						
Idade						
Peso (kg) **						
Altura (m) **						
Fuma? ***						
Consome bebidas alcoólicas? ***						

\* Classificar o morador como Residente Fixo; Residente temporário (2 – 5 dias por semana), Turista (menos de 2 dias por semana até 15 dias por ano).

\*\* Quando o entrevistado não souber responder, oferecer para medir (com balança e fita-métrica) o peso e altura.

\*\*\* Nas questões sobre o hábito de fumar ou consumir bebidas alcoólicas, responder apenas "Sim" ou "Não" para cada pessoa da propriedade.

Considerar as seguintes possibilidades para preenchimento na tabela: NR: Não respondeu; NS: Não soube informar.

Simbologia das alternativas: { } – independentes

[ ] – excludentes



- 9) Qual a raça/cor que o (a) sr(a) atribui a si mesmo e aos residentes desta casa. **(Caso os outros residentes não estejam presentes no momento da entrevista, coletar a resposta dos outros residentes mesmo que heterodeclarada. Marcar com um “X”, havendo a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)**

Raça/cor	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Branco						
Preto						
Pardo						
Indígena						
Amarela						
Não respondeu						
Não soube informar						

- 10) Qual o nível de escolaridade ou até qual série o(a) sr(a) estudou? (Marcar com um “X” a opção selecionada, com exceção de a resposta ser “Outro”, onde há necessidade de informar sobre o que se refere. No caso de seleção de uma das opções já listadas, há a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)

Nível de escolaridade	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não alfabetizado						
Ensino Pré Escolar ou equivalente						
Ensino Fundamental incompleto ou equivalente						
Ensino Fundamental completo ou equivalente						
Ensino Médio incompleto ou equivalente						
Ensino Médio completo ou equivalente						
Ensino Superior incompleto ou equivalente						
Ensino Superior completo ou equivalente						

Simbologia das alternativas:

{ } – independentes

[ ] – excludentes



Outro (Qual?)						
Não respondeu						
Não soube informar						

Equivalência considerada:

- Ensino Pré Escolar: Educação Infantil, Jardim de Infância, Creche.
- Ensino Fundamental: Primário e Ginásio, 1º Grau.
- Ensino Médio: Colegial, 2º Grau.
- Ensino Superior: Ensino Universitário, 3º Grau.

No caso da opção "Não alfabetizado", considera-se o caso da pessoa que nunca frequentou uma escola ou que não tenha nenhum conhecimento de leitura.

11) Qual profissão, função, ou atividade que o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa possuem? **(Há a possibilidade de mais de uma de indicação. Marcar com um "X" a opção selecionada, com exceção de a resposta ser "Outro", onde há necessidade de informar sobre o que se refere. Se a resposta for "Trabalhador rural em outra localidade", é necessário indicar a localidade.)**

Profissão	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Trabalhador rural na própria propriedade						
Trabalhador rural na propriedade de outras pessoas da comunidade						
Trabalhador rural em outra localidade (Qual localidade?)						
Pescador						
Comerciante						
Do lar						
Aposentado						
Estudante						
Desempregado						
Outro (Qual?)						
Não respondeu						
Não soube informar						

Simbologia das alternativas:

{ } – independentes

[ ] – excludentes



12) Houve mudanças nessas profissões, funções ou atividades após o rompimento da barragem?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Se sim, qual era sua profissão antiga? (Há a possibilidade de mais de uma de indicação. Marcar com um "X" a opção selecionada, com exceção de a resposta ser "Outro", onde há necessidade de informar sobre o que se refere. Se a resposta for "Trabalhador rural em outra localidade", é necessário indicar a localidade.)

Profissão	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Trabalhador rural na própria propriedade						
Trabalhador rural na propriedade de outras pessoas da comunidade						
Trabalhador rural em outra localidade (Qual localidade?)						
Pescador						
Comerciante						
Do lar						
Aposentado						
Estudante						
Desempregado						
Outro (Qual?)						
Não respondeu						
Não soube informar						

#### Vulnerabilidades socioeconômicas

13) O(a) sr(a) ou algum morador da casa possui CadÚnico, o Cadastro Único da Assistência Social, aquele cadastro feito para participação de programas sociais, como o Bolsa Família?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

14) O(a) sr(a) ou algum outro morador desta casa já foi atendido em algum CRAS, Centro de Referência de Assistência Social, ou outra Unidade de Assistência Social?

Sim, antes do rompimento da barragem (Qual? \_\_\_\_\_)

Simbologia das alternativas: { } – independentes [ ] – excludentes





Sim, após o rompimento da barragem (Qual? \_\_\_\_\_)

Não       Não soube informar       Não respondeu

15) O(a) sr(a) ou algum outro morador desta casa recebe Benefício de Prestação Continuada, o BPC, ou LOAS, Bolsa Família, ou outro benefício do governo

Sim (Qual? \_\_\_\_\_)

Não       Não soube informar       Não respondeu

16) O(a) sr(a) ou algum outro morador desta casa recebe ou recebeu algum dos auxílios emergenciais por situação de desastre ou calamidade pública citados abaixo?

Auxílio Emergencial COVID -19 – Governo Federal

Auxílio Emergencial da Vale aos Atingidos

Não recebeu / recebe

Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Não soube informar

Não respondeu

**Informações sobre a propriedade (local da entrevista):**

17) O que o(a) sr(a) e os outros moradores fazem com o lixo produzido nesta casa?

Separa para coleta do caminhão de lixo do município       Separa para coleta seletiva

Joga em terrenos baldios       Outros (O quê? \_\_\_\_\_)

Queima o lixo e o enterra       Não soube informar       Não respondeu

18) Como é feito o tratamento de esgoto sanitário desta casa? **(Entrevistador: Caso o morador não saiba informar, tente solicitar que descreva/mostre seu sistema de esgoto de forma que possa ser identificado)**

Fossa Séptica       Coleta por concessionária

Não possui       Outros (Como? \_\_\_\_\_)

Não soube informar       Não respondeu

19) Esta casa ou algum outro ponto do terreno tiveram contato com a lama de rejeito quando a barragem se rompeu?

Sim       Não       Não soube informar       Não respondeu

20) Esta casa ou algum outro ponto do terreno tiveram contato com água ou lama de rejeito nos períodos de cheia do rio \_\_\_\_\_? **(Entrevistador: inserir o nome do corpo/curso d'água afetado dentro da área alvo)**

Sim  Não       Não soube informar       Não respondeu

Simbologia das alternativas:       – independentes       – excludentes





**respostas “Pesca (econômica)” ou “Pesca (lazer)” não tenham sido indicadas para nenhum morador da propriedade, pular para questão 31)**

- Pesca (econômica)                       Pesca (lazer)
- Uso de barco ou outras embarcações (transporte)
- Uso de barco ou outras embarcações (lazer)
- Retirada de areia                       Nado ou outras atividades esportivas
- Atividades domésticas                       Não utilizava o corpo d’água (rio) para nenhuma atividade
- Outro (Qual?)                       Não soube informar

29) O que era feito com o peixe pescado antes do rompimento da barragem?

- Consumo familiar                       Venda em cooperativas/mercados
- Venda para vizinhos/conhecidos                       Outro (Qual? \_\_\_\_\_)
- Não soube informar                       Não respondeu

30) **Antes** do rompimento da barragem, quais as espécies de peixes pescados

---

31) **Antes** do rompimento da barragem, o(a) sr(a) ou os outros moradores desta casa plantavam vegetais, como verduras, legumes, frutas, grãos, raízes no terreno desta casa?  
**(Caso a resposta seja negativa, pular para questão 34)**

- Sim                       Não                       Não soube informar                       Não respondeu

O(a) sr(a) pode me falar o que era plantado no terreno desta casa?

---

32) **Antes** do rompimento da barragem, para que eram plantados os vegetais, como verduras, legumes, frutas, grãos, raízes no terreno desta casa?

- Consumo familiar                       Venda em cooperativas/mercados
- Venda para vizinhos/conhecidos                       Outro (Qual? \_\_\_\_\_)
- Não soube informar                       Não respondeu

33) **Antes** do rompimento da barragem, de onde vinha a água que era utilizada para as plantas ou árvores no terreno desta casa?

- rio \_\_\_\_\_                       Nascente
- outro rio, córrego, lagoa (Qual? \_\_\_\_\_)  Caminhão-pipa
- Concessionária de abastecimento                       Outro (Qual? \_\_\_\_\_)
- Poço na propriedade                       Não soube informar                       Não respondeu

Simbologia das alternativas:                       – independentes                       – excludentes



34) **Antes** do rompimento da barragem, de onde vinham os vegetais, como verduras, legumes, frutas, grãos ou raízes que o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa comiam?

} Própria propriedade

} Propriedades vizinhas

} Mercado ou quitanda da comunidade ou bairro

} Outra localidade (Qual? (município, bairro, etc.) \_\_\_\_\_)

} Não soube informar

35) Antes do rompimento da barragem, havia criação de animais de estimação?

Sim     Não     Não soube informar     Não respondeu

Em caso positivo quais eram os animais criados no terreno desta casa?

---

---

36) Antes do rompimento da barragem, havia criação animal como vacas, galinhas, peixes, abelhas e outros no terreno da sua casa? **(Caso a resposta seja negativa, pular para questão 39)**

Sim     Não     Não soube informar     Não respondeu

Em caso positivo quais eram os animais criados na no terreno desta casa?

---

---

37) **Antes** do rompimento da barragem, quais eram os produtos de origem animal produzidos no terreno desta casa?

} Leite e derivados                       } Ovo

} Carne                                       } Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

} Não soube informar     } Não respondeu

38) **Antes** do rompimento da barragem, o que o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa faziam com esses produtos de origem animal produzidos no terreno desta casa?

} Consumo familiar                       } Venda em cooperativas/mercados

} Venda para vizinhos/conhecidos     } Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

} Não soube informar                       } Não respondeu

**Após o rompimento da barragem:**

39) Desde o rompimento da barragem, de quanto em quanto tempo o(a) sr(a) tem contato direto com a lama de rejeito do rompimento da barragem? (Contato do rejeito com a pele,

Simbologia das alternativas:                       } – independentes                       [ ] – excludentes



por exemplo). (Marcar com um “X”, havendo a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)

Frequência	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Diário						
Algumas vezes na semana						
Algumas vezes por mês						
Raramente						
Não tem						
Não respondeu						
Não soube informar						

40) O contato com a lama de rejeito do rompimento da barragem ocorreu ou ocorre no terreno desta casa?

Sim       Não       Não soube informar       Não respondeu

Em caso negativo, onde ocorreu?

---

41) Desde o rompimento da barragem, o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa utilizam a água do \_\_\_\_\_ para quais dessas atividades? (Entrevistador: inserir o nome do corpo/curso d’água afetado dentro da área alvo. Marcar com um “X”, com exceção de a resposta ser “Outro”, onde há necessidade de informar sobre o que se refere. Há a possibilidade de mais de uma indicação por pessoa. Caso as respostas “Pesca (econômica)” ou “Pesca (lazer)” não tenham sido indicadas para nenhum morador da propriedade, pular para questão 46)

Atividade	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Pesca (econômica)						
Pesca (lazer)						
Uso de barco ou outras						

Simbologia das alternativas:      { } – independentes      [ ] – excludentes





Não						
Não respondeu						
Não soube informar						

45) O(a) Para quem o(a) sr(a) ou outros moradores desta casa vendem o peixe que pescam?  
**(Apenas caso “Venda” tenha sido selecionado como resposta da questão 43)**

- { } Vizinhos                      { } Cooperativas  
 { } Mercados                      { } Outros (Quais? \_\_\_\_\_)  
 { } Não soube informar      [ ] Não respondeu

46) O(a) sr(a) ou outros moradores desta casa criam peixe ou outro animal aquático em algum rio, córrego ou lago próximo ou no próprio terreno desta casa? **(Caso a resposta seja negativa, pular para questão 48)**

- [ ] Sim      [ ] Não      [ ] Não soube informar      [ ] Não respondeu

Em caso positivo, onde? \_\_\_\_\_

47) Quais as espécies de peixe ou outro animal aquático criados pelo(a) sr(a) ou outros moradores desta casa desde o rompimento da barragem?

48) De quanto em quanto tempo o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa comem peixe?

**(Entrevistador:**

- Esta pergunta só deve ser realizada àqueles entrevistados que indicaram consumo de peixe pescados nos rios impactados ou criados na área alvo.
- Marcar com um “X” a opção selecionada, com exceção de a resposta ser “Mais que 3 vezes por semana” ou “Outro”, onde há necessidade de informar sobre qual a frequência do consumo.
- No caso de seleção de uma das opções já listadas, há a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)

Frequência de consumo de peixe	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não consome peixe						
Diariamente						
1 vez por semana						
2 vezes por semana						
Mais que 3 vezes por semana (Qual frequência?)						
Outro (Qual frequência? (por exemplo, 1 vez a cada 15 dias, 1 vez por mês, etc.)						
Não respondeu						

Simbologia das alternativas:                      { } – independentes                      [ ] – excludentes







{ } Não soube informar

{ } Não respondeu

**ATENÇÃO: As questões 53) a 56) só devem ser respondidas se na questão 52) a resposta dada foi na “Própria propriedade” ou “Propriedades vizinhas”.**

53) Qual a quantidade de folhas, como couve, alface, repolho e outros o(a) sr(a) e os moradores desta casa comem em um dia?? **(Preencher no campo quantidade quantas folhas, cabeças, maços ou qualquer outra unidade que o entrevistado declarar. Informar a unidade declarada. Paras outras opções, marcar com X se for o caso)**

Consumo de hortaliças	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não consome hortaliças						
Quantidade						
Não soube informar						
Não respondeu						

54) Qual a quantidade de legumes e raízes, como chuchu, quiabo, abóbora, cenoura, batata, mandioca, e outros, o(a) sr(a) e os moradores desta casa comem em um dia? **(Preencher no campo quantidade quantas folhas, cabeças, maços ou qualquer outra unidade que o entrevistado declarar. Informar a unidade declarada. Paras outras opções, marcar com X se for o caso)**

Consumo de vegetais	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não consome vegetais						
Quantidade						
Não soube informar						
Não respondeu						

55) Qual a quantidade de grãos, como feijão, soja, e outros, o(a) sr(a) e os moradores desta casa comem em um dia? **(Preencher no campo quantidade quantas folhas, cabeças, maços ou qualquer outra unidade que o entrevistado declarar. Informar a unidade declarada. Paras outras opções, marcar com X se for o caso)**

Consumo de grãos	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não consome grãos						
Quantidade						
Não soube						

Simbologia das alternativas:

{ } – independentes

[ ] – excludentes



informar						
Não respondeu						

56) Qual a quantidade de frutas o(a) sr(a) e os moradores desta casa comem em um dia? **(Preencher no campo quantidade quantas folhas, cabeças, maços ou qualquer outra unidade que o entrevistado declarar. Informar a unidade declarada. Para outras opções, marcar com X se for o caso)**

Consumo de frutas	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não consome frutas						
Quantidade						
Não soube informar						
Não respondeu						

57) Desde o rompimento da barragem, há criação de animais de estimação?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Em caso positivo quais são os animais criados no terreno desta casa?

---



---

58) Desde o rompimento da barragem, há criação animal como vacas, galinhas, peixes, abelhas e outros no terreno da sua casa? **(Caso a resposta seja negativa, pular para questão 63)**

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Em caso positivo quais são os animais criados no terreno desta casa?

---



---

59) Desde o rompimento da barragem, quais são os produtos de origem animal produzidos no terreno desta casa?

Leite e derivados  Ovo

Carne  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Não soube informar  Não respondeu

60) O que o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa fazem com esses produtos de origem animal, \_\_\_\_\_ **(Entrevistador: mencionar os produtos marcados na questão anterior)**

Consumo familiar  Venda em cooperativas/mercados

Venda para vizinhos/conhecidos  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Simbologia das alternativas:  – independentes  – excludentes



Não soube informar                     Não respondeu

61) Desde o rompimento da barragem, de onde vem a água que os animais criados no terreno desta casa bebem?

rio \_\_\_\_\_                     Nascente

outro rio, córrego, lagoa (Qual? \_\_\_\_\_)                     Caminhão-Pipa

Concessionária de abastecimento                     Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Poço na propriedade                     Não soube informar                     Não respondeu

62) Desde o rompimento da barragem, de onde vem os alimentos de origem animal que o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa comem, como carne, leite e ovos? (**Caso a resposta dada seja “Mercado ou quitanda da comunidade ou bairro”, “Outra localidade”, “Não soube informar” ou “Não respondeu”, pular para questão 65)**)

Própria propriedade

Propriedades vizinhas

Mercado ou quitanda da comunidade ou bairro

Outra localidade (Qual? (município, bairro, etc) \_\_\_\_\_)

Não soube informar                     Não respondeu

**ATENÇÃO: As questões 63) e 64) só devem ser respondidas se na questão 62) a resposta dada foi na “Própria propriedade” ou “Propriedades vizinhas”.**

63) Quantos copos de leite o(a) sr(a) bebe em um dia? (**Marcar com um “X” a opção selecionada, com exceção de a resposta ser “Mais que 1L”, onde há necessidade de informar sobre o quanto se consome. No caso de seleção de uma das opções já listadas, há a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)**)

Consumo de leite	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não consome leite						
Menos que 0,25L (1 copo)						
Entre 0,25L e 0,5L (entre 1 e 2 copos)						
Entre 0,5L e 1L (entre 2 e 4 copos)						
Mais que 1L (Quanto?)						
Não soube informar						
Não respondeu						

OBS: Considerar como referência o copo americano.

64) Quantos ovos o(a) sr(a) come em um dia? (**Marcar com um “X” a opção selecionada, com exceção de a resposta ser “Mais que 3 unidades”, onde há necessidade de informar**)

Simbologia das alternativas:                     – independentes                     – excludentes



sobre o quanto se consome. No caso de seleção de uma das opções já listadas, há a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)

Consumo de ovo	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Não consome ovo						
1 unidade						
2 unidades						
3 unidades						
Mais que 3 unidades (Quantos?)						
Não soube informar						
Não respondeu						

65) O(a) sr(a) sabe se alguém que mora neste bairro ou comunidade se alimenta de animais silvestres caçados ou apanhados nas redondezas, como rãs, pássaros, tatus, javali e outros?

Sim       Não       Não soube informar       Não respondeu

Em caso positivo, quais? \_\_\_\_\_

**Poeira:**

66) Desde o rompimento da barragem, o(a) sr(a) acha que a poeira do ambiente aumentou?

Aumentou muito, se comparado a antes do rompimento

Aumentou pouco, se comparado a antes do rompimento

Permanece igual, se comparado a antes do rompimento

Diminuiu, se comparado a antes do rompimento

Não soube informar       Não respondeu

Em caso positivo de aumento, consegue descrever as características desta poeira (cor, se é “pegajosa/oleosa” ou não, etc)?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Abastecimento de água:**

**Antes do rompimento da barragem:**

67) Antes do rompimento da barragem, de onde vinha a água utilizada pelas pessoas desta casa?

{ } rio \_\_\_\_\_ { } outro rio, córrego, lagoa (Qual? \_\_\_\_\_)

Simbologia das alternativas:

{ } – independentes

[ ] – excludentes





Menos que 0,5L (2 copos)						
Entre 0,5L e 1L (entre 2 e 4 copos)						
Entre 1L e 1,5L (entre 4 e 6 copos)						
Entre 1,5L e 2L (entre 5 e 8 copos)						
Mais que 2L (mais de 8 copos) (Quanto?)						
Não soube informar						
Não respondeu						

OBS: Considerar como referência o copo americano.

71) Desde o rompimento da barragem, a residência tem sido abastecida com água do \_\_\_\_\_ para algum destes usos domésticos (**Entrevistador: inserir o nome do corpo/curso d'água afetado dentro da área alvo**)?  
**(Caso a resposta seja negativa, pular para questão 73)**

[Banhos][Torneiras][Cozinhar][Beber][Lavar roupas][Outros] \_\_\_\_\_

72) Desde o rompimento da barragem, o(a) sr(a) percebeu alguma mudança na água utilizada nesta casa?

Sim, de cor.

Não

Sim, de cheiro.

Outro (O que? \_\_\_\_\_)

Sim, de gosto.

Não soube informar  Não respondeu

#### Perspectivas do entrevistado:

73) Na sua opinião, quais os maiores problemas que o rompimento da barragem causou neste bairro ou comunidade? (**Entrevistador: Caso tenha sido feita uma síntese da resposta do entrevistado, releia de volta ao mesmo e pergunte se concorda ou se necessita de complementação**)

---



---

74) E quais os maiores problemas que o rompimento da barragem causou aqui na cidade de \_\_\_\_\_? (**Entrevistador deve informar o nome da cidade em que a entrevista está ocorrendo. Caso tenha sido feita uma síntese da resposta do entrevistado, releia de volta ao mesmo e pergunte se concorda ou se necessita de complementação**)

---



---



---

Simbologia das alternativas:

– independentes

– excludentes



75) Após o rompimento da barragem, o(a) sr(a) observou alguma mudança no meio ambiente da sua comunidade?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

76) Se observou alteração no meio ambiente, onde observou este(s) tipo(s) de alteração(ões)?

{ } Solo { } Água { } Ar  
{ } Plantações { } Animais { } Outro (Qual?\_\_\_\_\_)

Quais foram elas?

---

---

77) O rompimento da barragem alterou algo em sua vida? **[Entrevistador: pular a próxima questão se a resposta for negativa].**

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Pode falar como foi afetado pelo rompimento da barragem?

---

---

---

**(Entrevistador: Caso tenha sido feita uma síntese da resposta do entrevistado, releia de volta ao mesmo e pergunte se concorda ou se necessita de complementação)**

78) **Desde** o rompimento da barragem, as atividades de lazer, ou seja, aquelas atividades realizadas pelo(a) sr(a) e os outros moradores desta casa para se divertir ou descansar, foram prejudicadas?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Se sim, indique quais atividades de lazer foram prejudicadas.

---

---

#### **Preocupações com a saúde:**

##### **Antes do rompimento da barragem:**

79) **Antes** do rompimento da barragem, o(a) sr(a) ou outros moradores desta casa apresentavam algum problema de saúde? **[Entrevistador: pular a próxima questão se a resposta for negativa].**

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Simbologia das alternativas: { } – independentes [ ] – excludentes



O(a) sr(a) pode me falar quais eram os problemas de saúde de cada morador desta casa?

Problemas de saúde	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Problema de saúde 1						
Evolução do problema 1						
Problema de saúde 2						
Evolução do problema 2						
Problema de saúde 3						
Evolução do problema 3						

Referente a **evolução do problema** de saúde após o rompimento, considerar a seguinte numeração para preenchimento do quadro acima:

1 - Não piorou após o rompimento; 2 - Piorou um pouco após o rompimento; 3 – Piorou muito após o rompimento; 4 – Melhorou após o rompimento

Simbologia das alternativas: { } – independentes

[ ] – excludentes





**Após o rompimento da barragem:**

80) Desde o rompimento da barragem, as suas preocupações com a sua saúde aumentaram, reduziram ou continuaram a mesma?

Aumentaram                       Reduziram                       Continuaram a mesma

Não soube informar               Não respondeu

81) Desde o rompimento da barragem, as suas preocupações com a saúde dos demais moradores desta casa aumentaram, reduziram ou continuaram a mesma?

Aumentaram                       Reduziram                       Continuaram a mesma

Não soube informar               Não respondeu

82) Após o rompimento da barragem, comparado ao que era antes, a sua saúde e a dos outros moradores desta casa ficou? **(Marcar com um “X” a opção selecionada, havendo a possibilidade de apenas uma indicação por pessoa)**

Saúde atual	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Muito melhor depois do que antes do rompimento						
Um pouco melhor depois do que antes do rompimento						
Igual estava antes do rompimento						
Um pouco pior depois do que antes do rompimento						
Muito pior depois do que antes do rompimento						
Não soube informar						
Não respondeu						

Simbologia das alternativas:

{ } – independentes

[ ] – excludentes



83) O(a) sr(a) ou outros residentes da propriedade apresentaram algum problema de saúde **após** o rompimento da barragem?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

Em caso positivo, quais problemas de saúde e em quais membros da família que reside na propriedade? **(Especificar o problema principal e os secundários)**

	Entrevistado	Residente 1	Residente 2	Residente 3	Residente 4	Residente 5
Problema principal de saúde						
Quanto tempo após o rompimento?						
Relaciona o problema de saúde com o rompimento?						
Relaciona com o quê (exposição)?						
Outro problema de saúde						
Quanto tempo após o rompimento?						
Relaciona o problema de saúde com o rompimento?						
Relaciona com o quê (exposição)?						
Outro problema de saúde						
Quanto tempo						

Simbologia das alternativas: { } – independentes

[ ] – excludentes



após o rompimento?						
Relaciona o problema de saúde com o rompimento?						
Relaciona com o quê (exposição)?						

Quanto tempo depois do rompimento o problema se manifestou?

- 1 - No mês seguinte ao rompimento (fevereiro de 2019)
- 2 - De dois a seis meses após o rompimento (março de 2019 a agosto de 2019)
- 3 - Após 6 meses do rompimento (de setembro de 2019 em diante)
- 9 - Não soube informar
- 10 - Não respondeu

Relaciona o problema de saúde com o rompimento?

- S. Sim
- N. Não
- 9 - Não soube informar
- 10 - Não respondeu

Se sim, relaciona o problema de saúde com o quê?

- 1 - Água do rio Paraopeba
- 2 - Água da represa
- 3 - Água da lagoa ou afluentes do rio Paraopeba
- 4 - Água do poço (cacimba ou artesiano)
- 5 - Rejeito
- 6 - Solo
- 7 - Poeira
- 8 - Outro. Qual?
- 9 - Não soube informar
- 10 - Não respondeu

Simbologia das alternativas: { } – independentes

[ ] – excludentes





86) Quando o(a) sr(a) ou outros moradores desta casa estão com algum problema de saúde, onde buscam atendimento médico?

Normalmente não busca assistência à saúde  Serviço público

Serviço particular / convênio  Outro (Qual? \_\_\_\_\_)

Não soube informar  Não respondeu

87) Quais dessas ações o(a) sr(a) e os outros moradores desta casa fazem para prevenir problemas de saúde?

Hábitos de higiene (tomar banho todos os dias, escovar os dentes após todas as refeições, lavar as mãos antes de comer etc.)

Frequenta regularmente unidades de saúde  Filtrar água antes de beber

Exercitar-se regularmente  Não fumar/beber

Manter uma alimentação saudável  Realizar atividades de lazer regularmente

Não soube informar  Não respondeu

88) Após o rompimento da barragem, o(a) sr(a) notou, em sua comunidade aumento no uso de álcool ou drogas?

Sim  Não  Não soube informar  Não respondeu

**Informações adicionais:**

89) O(a) sr(a) gostaria de falar alguma coisa que acha importante e que não perguntamos?

---

---

---

---

---

**(Entrevistador: Caso tenha sido feita uma síntese da resposta do entrevistado, releia de volta ao mesmo e pergunte se concorda ou se necessita de complementação)**

Simbologia das alternativas:

– independentes

– excludentes



# **APÊNDICE 07**

## **Cartilha dos Estudos de Avaliação de Risco a Saúde Humana e Ecológico**



## Storyboard - Estudos de Avaliação de Risco

**VALE**



# criação





## Tela 1



### Locução

Entenda os Estudos de Avaliação de Risco à saúde humana e ecológico



## Tela 2

Estudos serão  
**acompanhados**  
pelos órgãos  
públicos



Estudos serão  
**acompanhados**  
pelos órgãos  
públicos



### Locução

Devido ao rompimento da barragem B1, da mina de Córrego do Feijão, em Brumadinho, e os potenciais danos desse rompimento para as pessoas e meio ambiente, serão realizados os “Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e Ecológica”. Os estudos serão realizados por uma empresa especializada contratada, o Grupo Epa, e serão acompanhados por órgãos do poder público estadual, empresa auditora e pelo Ministério Público de Minas Gerais.



### Tela 3



#### Locução

Esses estudos têm o compromisso de verificar a existência de riscos à saúde humana e ecológicos associados às possíveis alterações ambientais causadas pelo rejeito derivado do rompimento da barragem na bacia do rio Paraopeba.



## Tela 4



## Locução

Os estudos serão divididos em cinco fases, que são:

- 1 - Definições das características da comunidade, da saúde e do meio ambiente
- 2 - Investigação para Saúde e Meio Ambiente
- 3 - Avaliações de Risco em relação à saúde, meio ambiente e sistema ecológico
- 4- Elaboração de um plano de gestão dos riscos que integre saúde, meio ambiente e sistema ecológico
- 5- Aplicação do plano de gestão dos riscos que integre saúde, meio ambiente e sistema ecológico



## Tela 5



### Locução

Nas fases 1, 2 e 4, estão previstas reuniões com as comunidades para que os moradores possam conhecer as atividades realizadas na fase anterior. O objetivo é mostrar para as pessoas as atividades que estão programadas para a fase seguinte, respeitando a transparência com a comunidade. A depender dos resultados, os estudos podem ser encerrados na fase 1 ou 2.



## Tela 6



### Locução

Para garantir a participação da comunidade e entender as principais preocupações em relação ao contato com o rejeito da barragem, na fase 1 serão realizadas reuniões com o Poder Público Municipal, líderes comunitários e comunidade.



## Tela 7



### Locução

Durante a fase dois, serão coletadas informações a partir de amostras de pequenas quantidades de solo, sedimento, água subterrânea e superficial, alimentos de origem animal e vegetal, e poeira em residências. Estas amostras serão analisadas, permitindo a identificação de seus principais componentes químicos que possam gerar algum efeito indesejado à saúde e ao meio ambiente.



## Tela 8



### Locução

É importante que toda a comunidade participe do processo de levantamento de dados, acompanhando e fiscalizando as atividades de campo, além de permitir que as equipes que estarão trabalhando e devidamente identificadas tenham acesso à sua residência.





## Tela 9



### Locução

Na fase três, serão calculados os riscos decorrentes do contato do ser humano, animais e plantas com a contaminação relacionada aos rejeitos provenientes do rompimento da barragem B1



## Tela 10



### Locução

Com os resultados da fase 3, na fase 4 serão definidas as ações de saúde pública, monitoramento e recuperação ambiental, obras de engenharia e atuação das instituições.



## Tela 11



### Locução

As comunidades serão chamadas para participar da construção das ações implementadas e que deverão ser aprovadas pelos órgãos públicos responsáveis.



## Tela 12

Reparação do  
**meio ambiente**  
e fortalecimento  
do **setor de saúde**



Reparação do  
**meio ambiente**  
e fortalecimento  
do **setor de saúde**

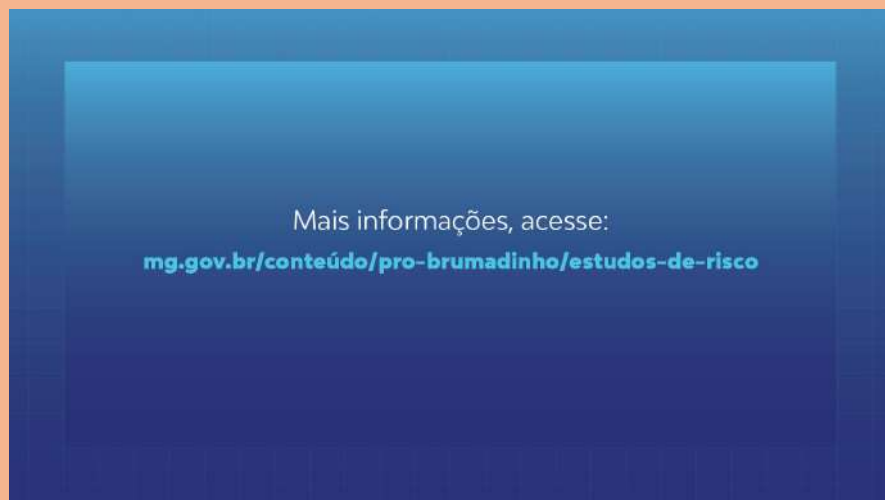


### Locução

Na quinta e última fase, as equipes vão a campo para executar as ações de reparação do meio ambiente e ações de fortalecimento do setor de saúde



## Tela 13



### Locução

Para mais informações sobre os Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e Meio Ambiente, acesse o site do Comitê Pró-Brumadinho.



**OBRIGADO**

stalo [IN]

ECOSISTEMA DE COMUNICAÇÃO | ECOSISTEMA DE COMUNICAÇÃO

CONEXÕES INTELIGENTES PARA O SEU NEGÓCIO

STALOIN.COM.BR



# APÊNDICE 08

## Informações e Dados sobre Toxicidade Humana



## 1. MECANISMOS DE TRANSPORTE

Para a avaliação de risco à saúde humana e ecológica, compreender os mecanismos tóxicos das substâncias químicas de interesse (SQI) é de grande importância, pois conhecer os mecanismos de transporte, como elas se comportam no meio físico (no ar, água e solo), auxilia para correlacioná-las com os caminhos de exposição, seus respectivos receptores e seus potenciais efeitos adversos na saúde humana, animais e vegetais. Neste contexto a descrição dos mecanismos de transporte nos compartimentos, de cada metal analisado, é apresentada a seguir:

### 1.1 ALUMÍNIO

O alumínio (Al) é o metal mais abundante na crosta terrestre e ocorre em um único estado de oxidação (Al +3). Na natureza está sempre associado a micas, feldspatos, óxidos e hidróxidos. Seu comportamento depende das coordenações químicas e suas partições reagem e complexam moléculas. O transporte e a partição dependem das propriedades químicas do elemento. O pH, por exemplo, quando diminui resulta em um aumento da mobilidade de formas monoméricas do alumínio, podendo causar chuvas ácidas.

A liberação natural ocorre pelas partículas oriundas do intemperismo de rochas ou solos que são transportadas por correntes de ar. Em determinados eventos, o elemento pode ser liberado para a atmosfera a partir de erupções vulcânicas. Já a liberação antropogênica está associada às queimas de carvão e produção industrial de alumínio, sendo que os compostos são encontrados em silicatos, óxidos e hidróxidos.

Quando o Al entra em contato com a água, tem-se um íon tetravalente de alumínio cercado por seis íons de água. Ele pode ser encontrado em águas utilizadas no tratamento da bauxita, em processos industriais correlacionados ao mineral ou pela deposição de partículas da atmosfera diretamente nos corpos d'água. A sua liberação também está associada à lixiviação de rochas aluminosas.

Apesar de ser um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, presente em grande parte dos minerais primários, o Al pode ser lançado nos solos e sedimento naturalmente pelo intemperismo de rochas com a deposição de minerais argilosos sedimentares, como os aluminossilicatos, caulinita e montmorilonita. O intemperismo causa a liberação do silício e do alumínio que precipitam na forma de óxidos de alumínio hidratados como Gibbsita e Boemita, que compõe as lateritas e bauxitas (BODEK *et al.*





1988 *apud* ATSDR, 2008). Além disso, o Al pode chegar aos sedimentos e solos através de ações antropogênicas pelo descarte de resíduos de mineração ou processos industriais.

## 1.2 ANTIMÔNIO

O antimônio (Sb) possui quatro estados de oxidação, sendo a forma mais estável +5 (Sb V) e em menor quantidade a forma +3 (Sb III). Além disso, as formas orgânicas estão menos presentes no ambiente em relação às inorgânicas. O Sb (V) corresponde ao íon antimonita octaédrico  $\text{Sb(OH)}_6$ , enquanto Sb (III) corresponde ao ácido antimonoso não carregado,  $\text{Sb(OH)}_3$  em sistemas de água com antimônio.

O Sb pode ser retido principalmente por adsorção como em minerais de argila ou óxidos e hidróxidos. Sb (III) absorve mais fortemente o oxidróxido de manganês (III) ( $\text{MnOOH}$ ) que o hidróxido de alumínio  $\text{Al(OH)}_3$  ou óxido-hidróxido de ferro (III) ( $\text{FeOOH}$ ) (WILSON *et al.* 2010 *apud* ATSDR, 2017).

O comportamento desse elemento em sistemas solo-água é dependente das condições redox. Quanto maior a saturação em água no solo menor será as concentrações de antimônio. Para que o Sb (V) seja estável, este deve ocorrer sob condições redutoras. Além disso, o antimônio tem uma correlação positiva com o ferro e manganês no solo (MITSUNOBU *et al.* 2006).

Sb (III) se liga mais fortemente aos sólidos que Sb (V) e a absorção de ambos é altamente dependentes do pH. Em níveis de  $\text{pH} < 7$ , Sb (V) é quase completamente adsorvido. De acordo com o estudo realizado por MIRAVET *et al.* (2006) *apud* ATSDR (2017), por meio da atividade antropogênica, as cinzas da queima do carvão em usinas de energia contêm uma mistura de produtos químicos que podem ser distribuídos em solos, água doce, água do mar ou lençóis freáticos. Essa cinza é lixiviada e forma soluções com Sb (V) em um pH entre 1 e 12, de forma que o antimônio é parcialmente solubilizado em um pH 5 tornando-se cada vez mais solúvel em valores de pH ácido.

Estudos realizados em sedimentos de rios de um distrito de mineração em Idaho, EUA, mostrou que a liberação de Sb antimônio trivalente dos sedimentos aumentaram em pH baixo. Em contraste, a liberação de antimônio pentavalente a partir de sedimentos aumentou bruscamente em pH alto (pH 11,4). Já em pH 4,3 as concentrações de antimônio tri e pentavalente foram parecidas (MOK e WAI, 1990 *apud* ATSDR, 2017).

Vale ressaltar que o Sb não é um elemento químico que costuma bioconcentrar (USEPA 1980 *apud* ATSDR, 2017), porém algumas plantas podem absorvê-lo do solo devido a sua deposição na superfície (TSCHAN *et al.* 2009 *apud* ATSDR, 2017).

O ingresso de Sb na atmosfera está vinculado aos processos antropogênicos e naturais. Os antropogênicos envolvem usinas de queima de carvão, casas de fundição ou refinarias que empregam o uso de antimônio. Naturalmente, o ingresso ocorre pela erosão eólica, erupções vulcânicas, incêndios e fontes biogênicas (BELZILE *et al.*, 2011 e NRIAGU, 1989 *apud* ATSDR, 2017). Além disso, as partículas de poeira sopradas pelo vento podem conter antimônio em espécies minerais, como sulfetos e óxidos e estão associados a silicatos. Podendo também ser liberado na atmosfera como aerossol, oxidado como trióxido de antimônio por reação com oxidantes atmosféricos.

A maior parte do antimônio presente nas águas está presente no estado de oxidação pentavalente como as espécies antimonatos  $Sb(OH)_6$  em condições aeróbicas (FILELLA *et al.* 2002 *apud* ATSDR, 2017). Já em condições de redução anóxica estão presentes espécies trivalentes, como  $Sb(OH)_3$ ,  $Sb(OH)_4$  e  $Sb_2S_4$  são as formas mais termodinamicamente estáveis (FILELLA *et al.* 2002 *apud* ATSDR, 2017). A especiação de antimônio em vários tipos de águas naturais foi analisada em um estudo realizado em Varsóvia, na Polônia. Das 12 amostras obtidas a maioria do Sb total estava na forma pentavalente (GARBOS *et al.* 2000 *apud* ATSDR, 2017). O Sb ocorre naturalmente por correntes ou fluxos de água em contato com o solo ou rochas que contenham o elemento. Ações antropogênicas como, por exemplo, indústrias de mineração, fundição ou indústrias de refinaria também são responsáveis por sua liberação no meio ambiente.

Sendo um componente natural do solo, cuja transformação ocorre por meio da atividade microbiana (LUO *et al.* 2014 *apud* ATSDR, 2017), apesar de ocorrer em baixas concentrações e em locais específicos. É liberado a partir de processos erosivos e intempéricos ou pelo despejo ou descarte de resíduos de indústrias de fundição, em geral, naquelas que utilizam ou produzem antimônio ou o trióxido de antimônio (ECKEL e LANGLEY, 1988 *apud* ATSDR, 2017).

### 1.3 ARSÊNIO

O arsênio (As) ocorre naturalmente no meio físico. No solo e nos sedimentos pode ser transportado pelas ações dos ventos ou no escoamento superficial, podendo chegar a

corpos d'água e até chegar a em maiores profundidades sob condições oxidantes por meio da lixiviação.

Devido à atividade humana, o elemento pode chegar à superfície a partir de regiões de mineração e locais de tratamento de metais associados ao arsênio como cobre e chumbo. Locais de atividades agrícolas podem apresentar este metal, porém nestes casos o arsênio tende a permanecer imóvel nas camadas superiores do solo. Na natureza, o arsênio pode ser proveniente de erupções vulcânicas.

Em geral, o As tende a se particionar no solo ou em sedimentos sob condições oxidantes. A lixiviação não costuma transportá-lo em grandes profundidades, entretanto essa migração é mais eficiente em solos arenosos do que em solos argilosos. Dentre as características do solo, como pH, teor de matéria orgânica, teor de argila, ferro, teor de óxido, o conteúdo de óxido de alumínio e a capacidade de troca catiônica (CEC) na adsorção de vários metais, o parâmetro mais influente que afeta a adsorção de As é o teor de ferro do solo (JANSSEN *et al.* 1997).

O arsênio passa pelo processo de adsorção quando ocorre junto com óxidos de ferro e manganês, sendo liberado em condições redutoras (LAFORCE *et al.* 1998; MCGEEHAN 1996; MOK E WAI 1994 *apud* ATSDR, 2007). A dissolução química pode ocorrer rapidamente em pH alto e influenciada pela ação microbiana com níveis de nutrientes adequados (LAFORCE *et al.* 1998 *apud* ATSDR, 2007).

Estudos realizados com As (V) e As (III) a respeito das propriedades de sorção (SMITH *et al.* 1999 *apud* ATSDR, 2007) mostraram que a adsorção no solo e em sedimentos é rápida, variando de acordo com o teor do óxido de ferro presente e com a mineralogia. Em relação ao pH, entre 5 e 7, as espécies dominantes de As (V) são  $H_2AsO_4$  e  $HAsO_4^{2-}$ , enquanto  $H_3AsO_3$  neutro é a espécie dominante de As (III). Para solos contendo baixas quantidades de minerais oxidados, o pH teve pouco efeito na sorção de As (V), enquanto para solos oxidados, uma diminuição na sorção foi evidente à medida que o pH aumentou. Em contraste, a sorção de As (III) aumentou com o aumento do pH.

Na água, o transporte e a partição dependem da forma (estado de oxidação e contração) do arsênio e das interações com outros materiais presentes. Quando as formas são solúveis, movem-se pela água percorrendo grandes distâncias em rios, por exemplo (USEPA, 1979 *apud* ATSDR, 2007). No entanto, o As pode ser absorvido da água por solos e sedimentos, especialmente por argilas e óxidos de ferro, hidróxidos de alumínio, compostos de manganês e material orgânico (USEPA, 1979, 1982c; WELCH *et al.* 1988 *apud* ATSDR, 2007).

As concentrações de As na água subterrânea, sob condições de oxidação e redução leve são controladas por adsorção. A extensão da adsorção de arsênio sob condições de equilíbrio é caracterizada pelo coeficiente de distribuição ( $K_d$ ) que mede a taxa de partição de equilíbrio do contaminante adsorvido ao dissolvido. O  $K_d$  depende do pH da água, da oxidação do arsênio e temperatura. Em águas ácidas e neutras, o As (V) é amplamente adsorvido, enquanto o As (III) é relativamente menos adsorvido (ATSDR, 2007).

O arsênio inorgânico trivalente existe predominantemente como ácido arenoso ( $H_3AsO_3$ ) no pH ambiental e não é fortemente adsorvido a sólidos e sedimentos em suspensão na coluna de água. Já o arsênio pentavalente inorgânico ocorre como  $H_2AsO_4$  e  $HAsO_4$  com grande capacidade de adsorção em relação ao trivalente (ATSDR, 2007). Em águas neutras e ácidas, o As (III) é menos adsorvido que As (V).

Quando liberado em rios por ações antropogênicas, move-se a jusante tanto na água quanto nos sedimentos, acumulando em animais, apesar de não acumular em níveis tróficos (EISLER, 1994; FARAG *et al.* 1998; WILLIAMS *et al.* 2006 *apud* ATSDR, 2007). Já na atmosfera, para onde vai a maior quantidade, o As provém de processos de alta temperatura como combustão de carvão e óleo, operações de fundição e incineração de resíduos, ocorrendo como partículas finas com um diâmetro médio de massa de cerca de 1  $\mu m$  (COLES *et al.* 1979; PACYNA 1987 *apud* ATSDR, 2007) podendo ser levadas pelo vento por quilômetros durante 7 a 9 dias (USEPA, 1982b; PACYNA, 1987 *apud* ATSDR, 2007). Com a precipitação atmosférica, o As chega até áreas costeiras e interiores próximos a indústrias. As plantas absorvem o arsênio do solo pelas raízes, porém em pouca quantidade.

Na atmosfera, é liberado como trióxido de carbono e, em menor quantidade, como arsinos (USEPA, 1982b *apud* ATSDR, 2007), onde sofre oxidação para o estado pentavalente e misturas das formas trivalente e pentavalente. Na água, pode sofrer uma série complexa de transformações, incluindo redução da oxidação, troca de ligantes, precipitação e biotransformação (USEPA, 1979, 1984a; SANDERS *et al.* 1994; WELCH *et al.* 1988 *apud* ATSDR, 2007). Os fatores que mais influenciam os processos de destino na água incluem Eh, pH, concentrações de íons sulfeto e sulfeto metálico, concentrações de ferro, temperatura, salinidade, distribuição e composição da biota, estação e natureza e concentração da matéria orgânica natural (USEPA, 1979; FARAGO, 1997; REDMAN *et al.* 2002; WAKAO *et al.* 1988 *apud* ATSDR, 2007). Já no solo e nos sedimentos, os



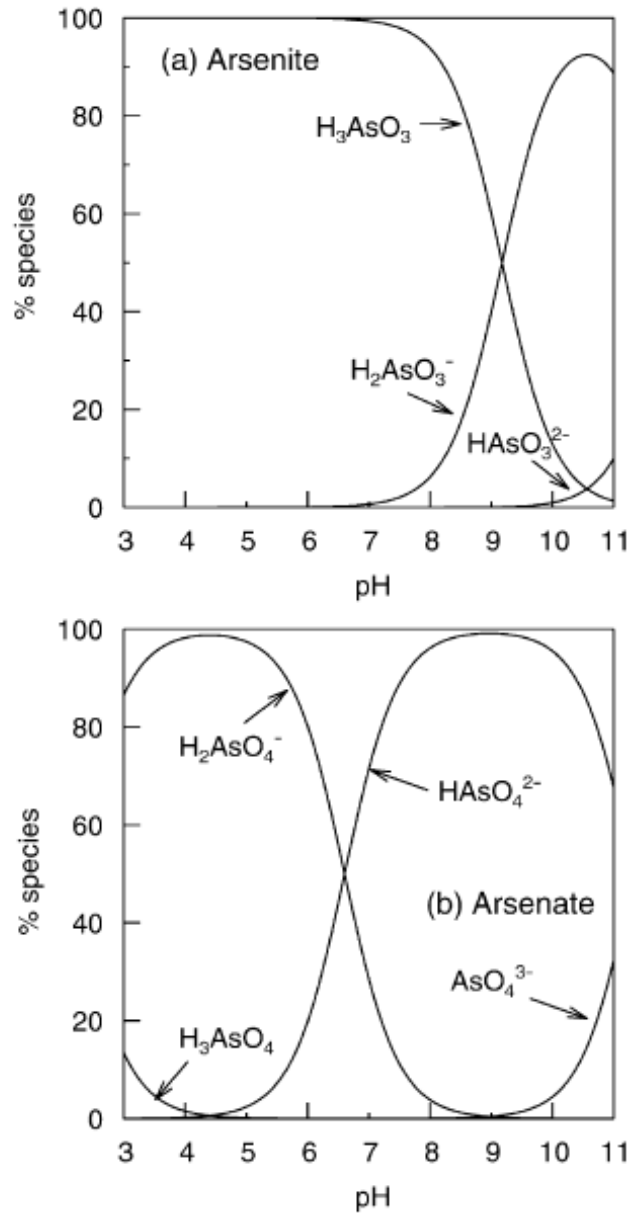
processos que acontecem são mais complexos envolvendo muitos processos bióticos e abióticos.

Em ambientes aquáticos oxigenados, o arsênio (V) possui maior estabilidade, ao passo que, quanto mais redutor o ambiente, o arsênio (III) passa a ser mais estável. A solubilidade de arsênio na água tende a aumentar proporcionalmente com o pH. O potencial redox (Eh) e pH condicionam a especiação do As em águas naturais, conforme Figura 1 e Figura 2.

A proporção das espécies de As ocorre de forma similar em solos e sedimentos, e variam conforme pH e Eh (volts) (Figura 3). As maiores proporções de As ocorrem como As (III) e As (V). Em condições oxidantes, o As (V) é predominante, enquanto em condições moderadamente oxidantes o As (V) pode ser reduzido para As (III). As espécies orgânicas de arsênio, como MMA (V), DMA (V) e TMAO ocorrem após metilação. As formas trivalentes MMA (III) e DMA (III) são rapidamente oxidadas quimicamente e biologicamente (ABDULLAH *et al.*, 1995 *apud* WANG & MULLIGAN, 2006).

Figura 1. Especiações do As (arsenito e arseniato) em função do pH.

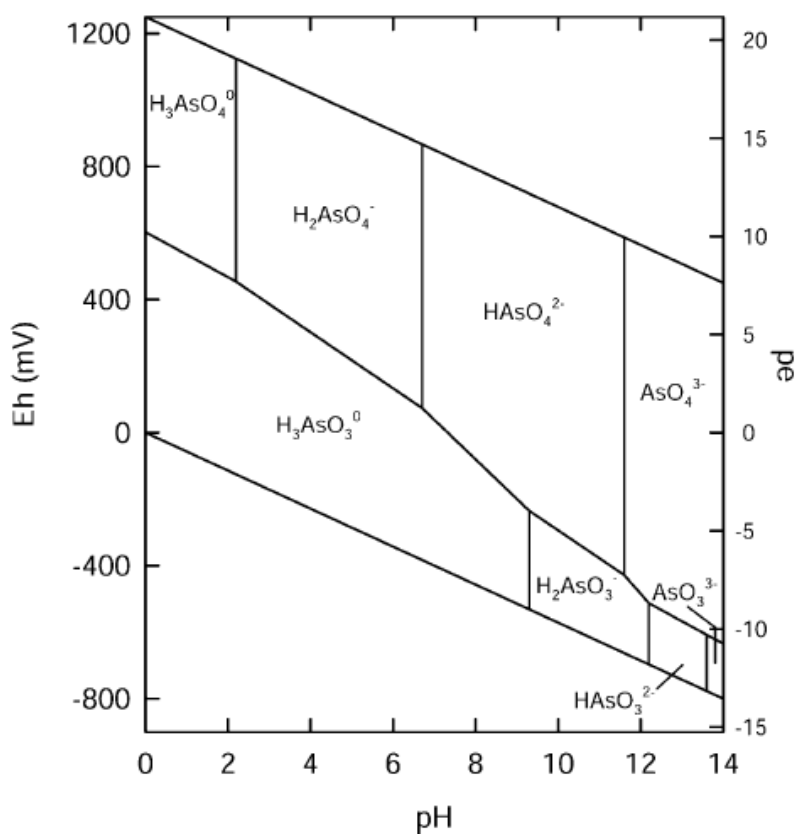




Fonte: Extraído de SMEDLEY & KINNIBURGH (2002)



Figura 2. Diagrama pH-Eh de arsênio para águas.

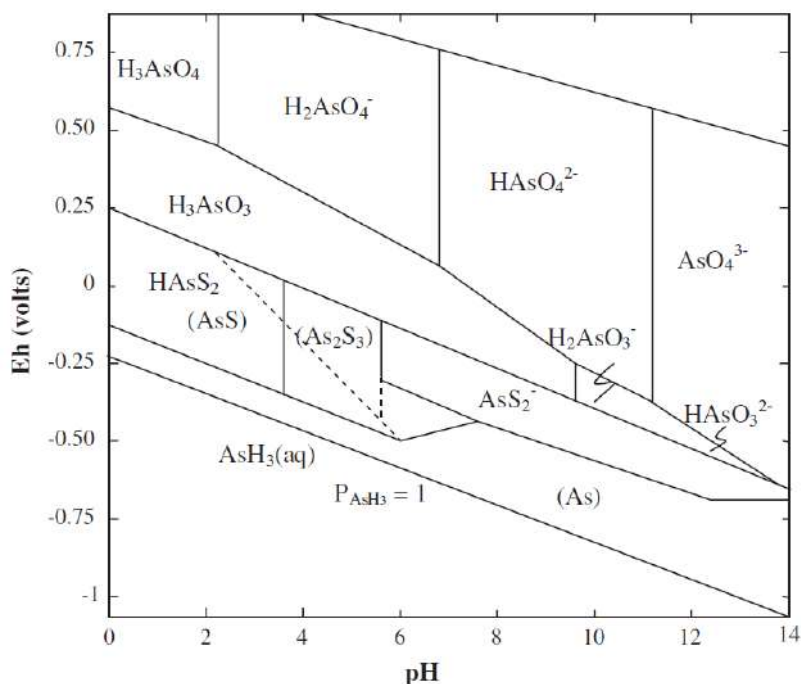


Fonte: Extraído de SMEDLEY & KINNIBURGH (2002)

Figura 3. Diagrama pH-Eh de arsênio em condição de 25,8 °C e 101.3 kPa para solos e sedimentos.







Fonte: Extraído de WANG & MULLIGAN (2006)

## 1.4 BÁRIO

O bário (Ba) ocorre naturalmente no meio físico em minerais como a barita e a witherita, ou como traços em rochas ígneas e sedimentares. O transporte ocorre principalmente pelo intemperismo dessas rochas ou minerais que são levados pela água ou pelos ventos (ATSDR, 2007). Já pela atividade antropogênica, grande parte do bário presente no meio ambiente é proveniente da atividade industrial em formas pouco dispersas (NG e PATTERSON, 1982 *apud* ATSDR, 2010) presente na atmosfera como partículas. No ar, o Ba é removido por deposição úmida e seca, apesar das alterações em sua especiação (USEPA, 1984 *apud* ATSDR, 2007). Sob condições naturais formará compostos no estado de oxidação +2 (BODEK *et al.* 1988 *apud* ATSDR, 2007).

Quando em contato com a água, o bário precipita na forma de sal insolúvel como BaSO<sub>4</sub> ou BaCO<sub>3</sub>, além de adsorver partículas em suspensão por meio da formação pares de íons com ânions naturais como bicarbonato ou sulfato na matéria (BODEK *et al.* 1988; USEPA 1984; GIUSTI *et al.* 1993; LAGAS *et al.* 1984; TANIZAKI *et al.* 1992 *apud* ATSDR, 2007). As fontes naturais de bário para a água são as rochas e minerais que o contém e são intemperizados pelo meio. Fontes antropogênicas estão associadas ao



descarte de águas contaminadas ou em concentrações elevadas nos rios e oceanos (ATSDR, 2007).

Quando rios entram em contato com oceanos, devido à presença do alto teor de sulfato, são precipitados sais de sulfato de bário diminuindo a quantidade de bário na superfície (BENES *et al.* 1983 *apud* ATSDR 2007). Nos sedimentos, o Ba se encontra na forma de sulfato de bário (barita). Em sedimentos de silte grossos, por exemplo, quando entram em um ambiente turbulento, trituram o sulfato de bário das partículas de sedimento, acumulando-se baritos densos (MEREFIELD 1987 *apud* ATSDR, 2007).

Outro mecanismo importante de remoção de bário são os organismos vivos marinhos que o absorvem como peixes e algas. Nos solos pode ser absorvido por plantas ou transportado por precipitação (BATES 1988 *apud* ATSDR, 2007) bioconcentrando. Em alguns casos, a troca catiônica é alta, de forma que a mobilidade é limitada pela adsorção (BATES, 1988; KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1984 *apud* ATSDR, 2007).

Na maioria dos solos, a mobilidade desse elemento é baixa, pois forma sais insolúveis em água e o íon de bário é incapaz de formar complexos solúveis com ácidos flúvico e húmico (WHO, 2001 *apud* ATSDR, 2007). As principais propriedades que influenciam o transporte do bário para as águas subterrâneas são a capacidade de troca catiônica, o pH e o teor de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Se o teor de carbonato de cálcio for alto, a mobilidade será reduzida devido a formação de  $\text{BaCO}_3$  (LAGAS *et al.* 1984 *apud* ATSDR, 2007) assim precipitará como sulfato de bário na presença de íons sulfato (BODEK *et al.* 1988; LAGAS *et al.* 1984 *apud* ATSDR, 2007). Caso esteja na presença de cloreto, o bário ficará mais móvel e terá maior probabilidade de ser lixiviado dos solos devido à alta solubilidade do cloreto de bário em comparação com outras formas químicas (BATES 1988; LAGAS *et al.* 1984 *apud* ATSDR, 2007).

Em relação ao pH do solo, quanto maior a acidez, mais móvel o bário se torna (OMS, 2001 *apud* ATSDR, 2007). Quando transportado junto a ácidos graxos, torna-se mais móvel devido a menor carga desses complexos e subsequente redução na capacidade de adsorção (LAGAS *et al.* 1984). Assim como no meio aquoso, as fontes naturais de Ba estão associadas ao intemperismo das rochas e minerais que o contém. Ações antropogênicas como o descarte e depósitos de rejeitos ou de solos industriais contendo bário são fontes relevantes (ATSDR, 2007).

No ar, o bário sofre oxidação, principalmente se o ar for úmido, e permanece na atmosfera por vários dias dependendo do tamanho, da natureza do particulado e das condições ambientais (USEPA, 1984; WHO, 2001 *apud* ATSDR, 2007). O bário é

liberado na atmosfera principalmente por atividades industriais, onde são emitidas grandes quantidades de gases de queima de combustível ou carvão, por exemplo, sendo transportado na forma particulada.

## 1.5 BORO

O Boro (B) nunca é encontrado sozinho da natureza e está sempre ligado ao oxigênio. Na atmosfera pode estar na forma de partículas ou aerossóis como boretos, óxidos de boro, boratos, boranos, compostos de organoboro, compostos de boro de halogeneto ou borazinas. Dependendo das condições atmosféricas e do tamanho das partículas, quando transportado pelo vento, o boro possui meia vida na ordem de dias (NRIAGU, 1979 *apud* ATSDR, 2010). Na água, os boratos são solúveis e são transportados para a atmosfera por precipitação e deposição a seco (USEPA, 1987 *apud* ATSDR, 2010), além de passarem facilmente por hidrólise formando o ácido monobásico fraco eletricamente neutro, ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) e o íon monovalente  $B(OH)_4$ . Caso a solução esteja concentrada, o boro pode se polimerizar formando arranjos moleculares complexos. O boro é liberado na atmosfera, de forma natural, por meio de oceanos, vulcões e vapor geotérmico. A liberação antropogênicas se dá por usinas a vapor geotérmica (carvão), usinas químicas e instalações de fabricação de fibra de vidro e outros produtos (ATSDR, 2010).

Estudos realizados em minerais com boro em sua composição concluíram que o elemento é altamente solúvel em água (RAI *et al.* 1986 *apud* ATSDR, 2010) e caso esses minerais sejam tratados convencionalmente com água residual, ele não será removido significativamente (MATTHIJS *et al.* 1999; PAHL *et al.* 2001; WAGGOTT 1969 *apud* ATSDR, 2010). Além disso, também pode ser precipitado junto com alumínio, silício ou ferro para formar compostos de hidroxborato nas superfícies de minerais (BIGGAR e FIREMAN, 1960 *apud* ATSDR, 2010). Podem ser introduzidos na água por meio do esgoto municipal, detergentes, resíduos de usinas de queima de carvão, fundições de cobre e indústrias que usam boro. Também é encontrado em águas residuais geotérmicas e fontes termais usadas para geração e aquecimento (ATSDR, 2010).

O boro é naturalmente introduzido no solo pelas águas de chuvas, intemperismo, dessorção de argilas e decomposição de matéria orgânica. Fontes antropogênicas incluem aplicação de fertilizantes ou herbicidas contendo boro, aplicação de cinzas, lodo de esgoto, o uso de águas residuais para irrigação ou o descarte de terra de resíduos

industriais (ATSDR, 2010). Quando o boro se encontra a base de água, pode facilmente ser absorvido por solos e sedimentos, onde as reações de adsorção e dessorção são os principais mecanismos que definem o destino do boro (RAI *et al.* 1986 *apud* 2010) sendo que esses processos dependem diretamente do pH da água e da composição química do solo e dos sedimentos. A quantidade de óxido de alumínio amorfo no solo é a propriedade que mais influencia a mobilidade do boro. Quanto maior a quantidade deste óxido, maior a mobilidade do boro (BINGHAM *et al.* 1971 *apud* 2010). Além disso, a quantidade de óxido de ferro também influencia a mobilidade do boro, porém com menos intensidade (SAKATA, 1987 *apud* ATSDR, 2010).

Quando há a formação de fases solidas nas superfícies minerais e/ou liberação lenta de boro por difusão do interior de minerais argilosos, a adsorção do boro pode não ser reversível em alguns solos (RAI *et al.* 1986; GRIFFIN e BURAU 1974 *apud* ATSDR, 2010). No caso desse elemento, a bioacumulação é pouco provável.

## 1.6 CÁDMIO

O cádmio (Cd) ocorre naturalmente no meio físico em minerais e ligado a outros metais ou como traços em rochas fosfáticas, bem como há contribuição de erupções vulcânicas em sua emissão. Fontes antropogênicas incluem atividades mineradoras, produção e refino de minérios associados ao cádmio e indústrias que utilizem produtos com cádmio (ATSDR, 2012).

A maior parte do Cd na natureza se particiona no solo quando liberado. Mesmo no ar, acaba formando um fluxo líquido para o solo (MORROW 2001; WILBER *et al.* 1992 *apud* ATSDR, 2012). O cádmio pode ser liberado no ambiente por emissões de incineradores de resíduos municipais, produção de metais não ferrosos e outros processos de alta temperatura (MORROW, 2001 *apud* ATSDR, 2012). Dependendo do tamanho, quando liberado na atmosfera por combustão pode estar na faixa respirável e está sujeito a transporte de longo alcance (STEINNES e FRIEDLAND 2006; WILBER *et al.* 1992 *apud* ATSDR, 2012) na ordem de milhares de quilômetros com tempo de residência atmosférico de 1 a 10 dias antes da deposição (USEPA, 1980d *apud* ATSDR, 2012). No caso das partículas maiores, como as provenientes de fundições, a deposição se dá pelo processo gravitacional em áreas a jusante do vento poluente. Esse elemento pode se dissolver nas gotículas de água atmosférica e ser removido por deposição úmida.

Em ambientes aquáticos, o cádmio é mais móvel que a maioria dos outros elementos traço e em geral suas afinidades de ligantes complexantes seguem a ordem dos ácidos húmicos (USEPA, 1979 *apud* ATSDR, 2012). Pequenas quantidades de Cd podem ser transportadas com partículas grossas ou até mesmo coloides e este trocar de lugar com o cálcio em águas não poluídas, enquanto em águas poluídas a adsorção ocorre por substâncias húmicas (USEPA, 1979 *apud* ATSDR, 2012).

A concentração do cádmio na água é inversamente proporcional ao pH e a concentração do material orgânico, pois o Cd nesse caso, só existe na forma +2, que não é influenciada pelo potencial oxidante ou redutor. No entanto, em ambiente redutor o sulfeto de cádmio pode ser formado e como este é pouco solúvel, ele tende a se precipitar (USEPA, 1983c; MCCOMISH e ONG, 1988 *apud* ATSDR, 2012). Em condições de baixa salinidade prevalece o cádmio livre (iônico) considerado uma forma tóxica (SPRAGUE, 1986 *apud* ATSDR, 2012). Seu tempo de permanência na água varia em torno de 4 a 10 dias (WESTER *et al.* 1992, *apud* ATSDR, 2012).

Em relação aos sedimentos, os processos mais importantes para o transporte do cádmio em leitos são a precipitação e a sorção. A adsorção ocorre devido ao ácido húmico presente enquanto o aumento sorção depende diretamente do aumento do pH. As bactérias também desempenham um papel importante na partição do cádmio da água para os sedimentos (BURKE e PFISTER 1988 *apud* ATSDR, 2012). A probabilidade dessa SQI ser mobilizada pela ressuspensão de sedimentos ou atividade biológica diminui quando ela está associada a minerais de carbonato, precipitado como composto sólido estável ou coprecipitado com óxidos de ferro hidratado (ATSDR, 2012). Sob condições variáveis de pH, salinidade e potencial redox, o Cd pode se dissolver dos sedimentos e retornar para a água (DOI 1985; USEPA 1979; FEIJTEL *et al.* 1988; MUNTAU e BAUDO 1992 *apud* ATSDR, 2012). Além disso, como é um composto que não forma compostos voláteis na água, a partição do ambiente aquático para a atmosfera não ocorre (USEPA 1979 *apud* ATSDR, 2012).

No solo os fatores que mais influenciam o transporte do cádmio são o pH, as reações de oxidação-redução e a formação de complexos (BERMOND e BOURGEOIS, 1992; HERRERO e MARTIN, 1993 *apud* ATSDR, 2012). Na presença de minerais argilosos com carga negativa, essa SQI pode realizar reações de troca. Caso isso aconteça, só há reversibilidade caso o pH seja ácido, pois a adsorção aumenta com o pH. A diminuição da mobilidade do cádmio no solo está diretamente ligada ao aumento da umidade, já que este fica retido. O cádmio, no entanto, pode ser lixiviado, especialmente em condições

ácidas (ELINDER 1985a; EPA 1979 *apud* ATSDR, 2012). As partículas de Cd podem ser arrastadas para o ar ou corroídas pela água, resultando em sua dispersão nesses ambientes (USEPA, 1985a *apud* ATSDR, 2012). O Cd é um componente natural do solo, em conjunto com outros metais. Em regiões de mineração de rochas fosfáticas ou em regiões que utilizam agrotóxicos ou fertilizantes a base de fosfatos pode haver maior concentração de cádmio no solo. Ainda, descartes de efluentes ou resíduos de solo contaminado ou produtos que contenham cádmio podem aumentar sua concentração no meio.

As plantas absorvem facilmente essa SQI do solo, entrando na cadeia alimentar de animais e humanos por bioacumulação. Os pHs baixos favorecem essa absorção que é potencializada pelas chuvas ácidas (ELINDER, 1992 *apud* ATSDR, 2012).

## 1.7 CHUMBO

O chumbo (Pb) é liberado na natureza principalmente por atividades antropogênicas, como em indústrias e fábricas de fundições de metais e baterias. (ATSDR, 2007). A principal via de mobilidade do chumbo é a atmosfera, onde é transportado pelo ar na forma de aerossóis submicrônicos viajando grandes distâncias (USEPA, 2006 *apud* ATSDR, 2019), após a dispersão, o chumbo em partículas finas é removido da atmosfera por deposição úmida, enquanto as partículas grossas por deposição seca (ATSDR, 2019). Caso se ligue ao solo e ao pó de estradas podem ser ressuspensos. O tamanho das partículas interfere na aerodinâmica, as partículas grandes se depositam mais rapidamente e próximas à fonte de emissão, enquanto as partículas menores tendem a se depositar a milhares de quilômetros da fonte de emissão (ATSDR, 2019).

Na água, a mobilidade do chumbo depende do pH e da força iônica da água. Em pH acima de 5,4, os carbonatos  $PbCO_3$  e  $Pb_2(OH)_2CO_3$  limitam a quantidade de Pb solúvel. A concentração de carbonato é dependente da pressão parcial de dióxido de carbono, pH e temperatura (USEPA, 1986 *apud* ATSDR, 2019). Nos rios, grande parte da quantidade de Pb se encontra na forma coloidal ou de partículas maiores não dissolvidas de carbonato de Pb, óxido de Pb, hidróxido de Pb ou outros compostos de Pb incorporados em outros componentes de partículas de superfície provenientes do escoamento. Adicionalmente, pode ser transportado junto com a matéria orgânica na água, podendo ocorrer também

como íons sorvidos ou como partículas minerais em sedimentos (ATSDR, 2019). O particionamento água-solo pode ocorrer com o Pb sendo adsorvido nas superfícies das partículas coloidais de forma instável. Na água, o chumbo é liberado principalmente por efluentes industriais, geralmente de indústrias que extraem, produzem ou utilizam compostos com a substância em questão.

Em relação ao chumbo no solo e nos sedimentos, ele geralmente permanece imóvel, porém existe a possibilidade de chegar até as águas subterrâneas devido ao escoamento superficial ou lixiviação, exceto em condições ácidas (USEPA, 1986; NSF, 1977 *apud* ATSDR, 2019), sendo seu acúmulo por meio da deposição atmosférica. O Pb possui uma grande capacidade de absorver elementos do entorno, porém não se dissolve facilmente na água presente nos poros, o que torna sua lixiviação um processo lento (ATSDR, 2019). A absorção desse elemento pelo solo depende de fatores como a solubilidade dos contaminantes, condutividade hidráulica do solo, composição da solução do solo, matéria orgânica, conteúdo mineral da argila do solo, pH e atividade microbiana (USEPA, 2006 *apud* ATSDR, 2019). O pH do solo é o fator que mais influencia as taxas de migração, solubilidade e fitodisponibilidade do chumbo.

As taxas de migração de Pb no solo são aumentadas em pH baixo, pois nessa situação as espécies metálicas ligadas a carbonatos, hidróxidos e outros componentes do solo têm maior probabilidade de se dissolver em solução (ATSDR, 2019). Em condições redutoras ou com presença de matéria orgânica, a mobilidade é potencializada. A adsorção nas interfaces minerais, a formação de complexos de metais orgânicos estáveis ou quelatos com matéria orgânica do solo e a precipitação de formas sólidas moderadamente solúveis do composto afetam o destino do chumbo, de modo que todos estes fatores dependem diretamente do tipo do solo, tamanho da partícula, teor de matéria orgânica, pH, presença de coloides e óxidos de ferro inorgânicos, capacidade de troca catiônica (CEC) e quantidade de Pb no solo (NSF, 1977; REDDY *et al.* 1995 *apud* ATSDR, 2019). O chumbo pode entrar nas águas superficiais a partir do solo, por meio de lixiviação e erosão dos particulados do solo. Assim como no meio aquoso, as fontes naturais de chumbo estão associadas ao descarte de solos contaminados ou resíduos industriais. O chumbo na forma particulada na atmosfera também contribui para o aumento da concentração do elemento no solo (ATSDR, 2007).





## 1.8 COBALTO

O cobalto (Co) é lançado para a atmosfera em forma de partículas, pois seus compostos não são voláteis. Seu transporte depende de tamanho e da densidade dessas partículas, bem como das condições meteorológicas, voltando à superfície (água, solo e sedimentos) por meio da chuva ou deposição seca (ATSDR, 2004). As partículas mais grossas e mais aerodinâmicas ( $> 2 \mu\text{m}$ ) podem viajar cerca de 10 km, concentrando-se em volta das fontes de emissão. As concentrações do elemento em rochas, minerais, plantas e animais são tratadas como traço, sendo fontes naturais, atividades vulcânicas e incêndios florestais. Fontes antropogênicas incluem a queima de combustíveis fósseis e tratamento de minérios associado ao cobalto (ATSDR, 2004).

Sedimentos e solos, como na maioria dos metais, costumam ser o repositório final de metais como o cobalto, porém dependendo das condições, este pode ser liberado na água. Ele pode ser transportado na forma dissolvida ou, no caso das partículas maiores, como sedimento em suspensão em rios, lagos e mar por correntes oceânicas, depositando-se em áreas de sedimentação ativa. Diferente da maioria dos elementos traço que são transportados em ambientes aquáticos por suspensão, o cobalto varia muito. Na água, o cobalto pode ocorrer naturalmente nas águas do mar ou águas subterrâneas, pelo contato com solos e rochas. Ações antropogênicas estão associadas aos efluentes industriais, geralmente de indústrias que extraem, produzem ou utilizam compostos com a substância em questão (ATSDR, 2004).

Em ambientes aquáticos, o cobalto costuma se ligar fortemente a substâncias húmicas. Caso haja a presença de ácidos húmicos e bactérias, os ácidos húmicos podem ser alterados e decompostos alterando as características de ligação. O pH também exerce influência no seu transporte, principalmente na migração do Co na água superficial, bem como a natureza do material húmico e da proporção de metal (ATSDR, 2004). Em geral, sua absorção se dá em torno de 1 a 2 horas.

Nos sedimentos, o potencial redox controla o comportamento do cobalto. Em condições de redução moderada o cobalto é liberado como  $\text{Co}^{2+}$  e, na presença de sulfeto, forma  $\text{CoS}$  (ATSDR, 2004). Nos solos, a mobilidade está inversamente relacionada à força com que é absorvido pelos constituintes do solo (ATSDR, 2004). Se estiver na presença de substâncias orgânicas, óxidos de ferro e manganês e materiais cristalinos como aluminossilicatos, o cobalto pode ficar retido. Materiais óxidos tendem a absorver

grandes quantidades de cobalto, ao contrário de minerais argilosos (MCLAREN *et al.* 1986 *apud* ATSDR, 2004). Solos próximos às regiões de mineração, rochas fosfáticas ou indústrias de processamento de minérios tendem a possuir maior teor de cobalto. Geralmente, cobalto apresenta baixa mobilidade por ser facilmente adsorvido por óxidos de ferro e manganês, e essa adsorção tende a aumentar conforme o meio se torna mais ácido ou na presença de coloides móveis (ATSDR, 2004). Caso o solo seja argiloso, a adsorção ocorrerá por meio de trocas catiônicas entre o cobalto e a argila. A complexação orgânica também aumenta a mobilidade e ocorre, por exemplo, devido à formação de lodo de esgoto (GERRITSE *et al.* 1982; WILLIAMS *et al.* 1985 *apud* ATSDR, 2004).

Apesar das quantidades serem pouco significativas, as plantas absorvem o cobalto do solo pelas raízes, além de ser obtido da atmosfera pelas suas folhas. Os peixes também absorvem essa SQI dos sedimentos e da água, que se acumula nas vísceras e escamas (ATSDR, 2004).

## 1.9 COBRE

Assim como na maioria dos elementos, o cobre (Cu) é inserido na atmosfera como material particulado por meios naturais como erupções vulcânicas ou por fontes antropogênicas que consistem nas queimas de carvão, incineração de resíduos municipais e zonas de fundição. É retirado da atmosfera por meio de sedimentação gravitacional, fixação das partículas nas gotículas das nuvens, deposição a seco ou colisão com a água da chuva. Como fatores que influenciam sua remoção, tem-se o tamanho das partículas, velocidade dos ventos e turbulência. Quando estão no ar, formam partículas se ligando ao oxigênio, carbono ou enxofre. Pequenas partículas podem permanecer na troposfera por até 30 dias (ATSDR, 2004).

Na água, o cobre também como material particulado se deposita sendo absorvido pela matéria orgânica, óxidos de manganês e ferro e argila (tanto na água quanto nos sedimentos) (ATSDR, 2004). Na coluna d'água, o período de adsorção alcança o equilíbrio entre 1 e 24 horas após a introdução do cobre (HARRISON e BISHOP, 1984 *apud* ATSDR, 2004). O ingresso de cobre na água está amplamente associado às partículas do solo ou da atmosfera, que são trazidos aos corpos da água por correntes, ou por ações antropogênicas através do descarte industrial. A concentração média natural de



cobre nas águas varia de 4 a 10 ppb, predominantemente na forma +2 na forma complexada (ATSDR, 2004).

O cobre presente no solo é proveniente do descarte de resíduos sólidos, usos agrícolas e da deposição atmosférica e acaba sendo absorvido principalmente nas camadas superficiais (ATSDR, 2004). A mobilidade é controlada por interações físico-químicas em que a SQI é adsorvida a matéria orgânica, óxidos de ferro e manganês, minerais de argila, minerais de carbonato ou ferro hidratado (USEPA 1979; FUHRER, 1986; JANSSEN *et al.* 1997; PETRUZZELLI, 1997; TYLER e MCBRIDE, 1982 *apud* ATSDR, 2004). A lixiviação é controlada pelo tipo de solo e pelo pH, em solos arenosos, por exemplo, quanto mais baixo o pH maior o potencial de ser lixiviado. Outros fatores que influenciam a mobilidade são: a força iônica (afeta a carga superficial e a interação iônica), os microrganismos presentes (afetam a absorção e a assimilação) e a quantidade de matéria orgânica (quanto menor a quantidade de M.O., mais influentes serão o conteúdo mineral ou quantidade de óxidos de Fe, Mn e Al na adsorção) (ATSDR, 2004). A concentração média natural em solos varia de 5 a 70 mg/Kg, podendo ser maior próximo a regiões minerárias (ATSDR, 2004).

## 1.10 CROMO

### 3.2

O cromo (Cr) é liberado na natureza majoritariamente por ação antropogênica e 40% do metal está na sua forma hexavalente, que é estável no ar, mas tende a reduzir para a forma trivalente no solo e água. Existem estudos que indicam que o cromo, especialmente na sua forma trivalente, é um dos metais que possui menor mobilidade no solo (SAHUQUILLO *et al.*, 2003 *apud* ATSDR, 2012).

Na atmosfera, o Cr está presente como partículas e são raras formas gasosas (CARY, 1982; KIMBROUGH *et al.* 1999; SEIGNEUR e CONSTANTINOUS, 1995 *apud* ATSDR, 2012); o tamanho e a densidade dessas partículas controlam o transporte e a partição desse elemento, enquanto a deposição se dá de maneira úmida e seca, tanto na terra quanto na água. O transporte na interface água-atmosfera não acontece, pois o cromo não volatiliza a partir da água com exceção dos sprays marítimos. A liberação de cromo para atmosfera provém principalmente de zonas industriais onde há queima de



combustíveis e produção e refino de metais, mas pode chegar naturalmente por erupções vulcânicas e fluxos de gás natural.

Na água, o Cr é depositado no sedimento e o pouco que permanece na coluna d'água está nas formas solúvel e insolúvel. Ocorre como cromo (III) em forma sólida e em suspensão, adsorvidos em óxidos de ferro, materiais orgânicos e argilosos (ATSDR, 2012). O ingresso de cromo na água está amplamente associado às partículas do solo ou da atmosfera, que são trazidos aos corpos da água por correntes, ou por atividades antropogênicas pelos descartes industriais. O cromo (VI) solúvel é persistente nos corpos d'água e tendem a ser reduzidos para forma (III) (ATSDR, 2004).

Em relação ao solo, o transporte do cromo depende da sua especiação, que é controlada pelo pH e pelo potencial redox do solo (ATSDR, 2004). Em geral, a forma mais presente nos solos é o cromo (III) que possui solubilidade e reatividade baixa, reduzindo sua mobilidade (BARNHART 1997; JARDINE *et al.* 1999; ROBSON 2003 *apud* ATSDR, 2012). Em condições oxidantes, o cromo (VI) se torna relativamente mais solúvel e, conseqüentemente, mais móvel (ATSDR, 2012). Descartes industriais ou deposição inadequada de solos contaminados são grandes contribuintes para elevar a concentração de Cr no solo.

## 1.11 FERRO

O ferro (Fe) é liberado ao meio físico por fontes naturais e antropogênicas, principalmente, nas formas inorgânicas de valências +2 e +3. Naturalmente, o ferro e seus compostos são liberados a partir do intemperismo das rochas e minerais que o contenham, bem como atividades vulcânicas. As principais fontes antropogênicas estão associadas à cadeia produtiva do ferro e derivados, como o aço, e também à queima de combustíveis fósseis (USEPA, 1984).

A partir da liberação do ferro na atmosfera, que pode ocorrer tanto pela ação do vento sobre rochas ou solos com ferro, bem como do lançamento antropogênico nas zonas de mineração e beneficiamento, a forma do ferro nestas condições tende a ser particulada. Os fatores que controlam a sua deposição é a densidade das partículas e condições climáticas, que induzem a deposição natural das mesmas.

O ingresso de Fe na água está associado às partículas do solo ou da atmosfera, que são trazidos aos corpos da água por correntes ou por ações antropogênicas através de

descartes industriais ou minerários. Fatores como as reações químicas de óxido-redução por agentes orgânicos e inorgânicos contribuem para o balanço de ferro nas águas. Esse tipo de reação depende de propriedades como o pH e potencial redox.

O ferro pode existir nas formas particulada, dissolvida ou em pequenas parcelas como coloides (USEPA, 1984). O ferro é componente comum e abundante nos solos. Fontes antropogênicas constituem descartes industriais ou deposição inadequada de solos contaminados. No solo, a forma mais abundante é a férrica (III), apesar de que o ferro (II) pode existir em solos menos oxigenados, geralmente alagados ou com alto teor de matéria orgânica. Geralmente, o Fe presente no solo não é móvel, tende a ficar retido no meio por reações químicas ou biológicas. Óxidos ou hidróxidos férricos na forma coloidal podem fazer com que o elemento seja transportado no solo. O principal fator químico que influencia na sua mobilidade é o pH, onde solos mais ácidos favorecem essa mobilidade (USEPA, 1984).

## 1.12 MANGANÊS

O manganês (Mn) é um constituinte natural do ar, solo e água. A liberação de Mn nesses meios pode ocorrer por fontes antropogênicas e condicionada pela disposição de produtos baseados em manganês ou por meio do uso e manufatura dos mesmos. O seu comportamento no solo (velocidade de transporte) varia conforme as características do mesmo. Na água a tendência é adsorção a partículas ou sedimentação (ATSDR, 2012).

Apesar das pressões de vapor do manganês serem desprezíveis, ele pode existir na atmosfera como material particulado suspenso e ser removido por sedimentação gravitacional ou, em menor quantidade, pela lavagem pela água da chuva (USEPA, 1984 *apud* ATSDR, 2012). As partículas transportadas permanecem por um período de dias no ar, variando de acordo com o tamanho da partícula e das condições atmosféricas (NRIAGU, 1979 *apud* ATSDR, 2012).

O manganês é um componente natural da água subterrânea e superficial em baixos níveis. A água potável e o contato dermal com esses corpos aquosos pode causar uma exposição a níveis reduzidos desse elemento químico (ATSDR, 2012). Nos rios o Mn é transportado por suspensão.

É um componente natural do solo sendo lançado no mesmo por meio da intemperização de rochas ou, por ações antropogênicas, por meio de resíduos de mineração ou processos industriais (ATSDR, 2012). Quando essa SQI é solúvel, a tendência de adsorver no solo depende da quantidade de matéria orgânica e da capacidade de troca catiônica.

### 1.13 MOLIBDÊNIO

No ar, o molibdênio (Mo) é liberado por processos industriais e depositado por ação gravitacional ou deposição úmida ou seca (IMOA, 2015; FITZGERALD *et al.* 2008 *apud* ATSDR, 2017). O molibdênio entra nos corpos d'água, principalmente, por meio de efluentes de diversas indústrias de mineração, moagem e fundição de urânio e cobre, produção de óleo de xisto, refino de petróleo e usinas a carvão. As partículas presentes no ar também podem ser uma forma de sua introdução no meio aquoso (ATSDR, 2017). Próximos a áreas de uso industrial, o Mo pode ser lixiviado para ambiente aquático. Os principais fatores que influenciam sua mobilidade são: pH da água, condições redox e composição dos sedimentos. Em pH baixo e sedimentos de baixo potencial redox, o acúmulo dessa SQI é favorecido. Adicionalmente, os altos conteúdos de matéria orgânica e de ferro também aumentam sua quantidade (FITZGERALD *et al.* 2008 *apud* ATSDR, 2017). Caso o ambiente seja redutor, os hidróxidos de manganês e de ferro em fase sólida tendem a se dissolver e o molibdênio que estava absorvido nestes compostos retorna a fase aquosa (ATSDR, 2017).

No solo, o enriquecimento de Mo se dá por deposição atmosférica, justificando as maiores concentrações estarem nas camadas superiores. Nessas camadas é onde se tem a maior quantidade de matéria orgânica, favorecendo as ligações (ATSDR, 2017). O pH também influencia na adsorção que é favorecida em solos mais ácidos, enquanto a sorção é diminuída em solos mais básicos. Naturalmente é encontrado no solo associado aos minerais molibdenita, powellite, wulfenita, ferrimolibdita e ilsemannita (USEPA 1979; FITZGERALD *et al.* 2008 *apud* ATSDR, 2017). Mo também pode penetrar os solos por meio das cinzas da incineração de resíduos sólidos municipais (IMOA 2015 *apud* ATSDR, 2017).



## 1.14 NÍQUEL

Na atmosfera, o níquel (Ni) é liberado na forma de material particulado, disperso pelos ventos e removido por processos gravitacionais que removem as partículas grandes (> 5µm), enquanto as pequenas são removidas por deposição úmida (lavagem pela chuva e pelas nuvens) e deposição a seco (SCHROEDER *et al.* 1987 *apud* ATSDR, 2005). A distância percorrida depois de sair da fonte depende do tamanho e da densidade das partículas, características da fonte e das condições meteorológicas. O tempo de remoção varia na ordem de horas (para partículas grossas) e dias (para partículas finas).

No ambiente aquático, o transporte depende da partição entre sólidos solúveis e particulados que afetam a adsorção, precipitação e complexação, que por sua vez, são influenciados pelo potencial redox, pH, força iônica da água, concentração e espécie do metal (RICHTER e THEIS, 1980 *apud* ATSDR, 2005). Na coluna d'água, a adsorção é o principal mecanismo de remoção no níquel. Caso haja matéria orgânica presente, essa adsorção será concorrida, limitando a quantidade de níquel, de modo que este acaba se precipitando por meio de sedimentação (MARTINO *et al.* 2003 *apud* ATSDR, 2005). Como é componente natural de solos e rochas, seu ingresso na água está associado às partículas do solo ou da atmosfera trazidas para os corpos da água por correntes, ou por ações antropogênicas através dos descartes industriais.

No solo, o principal processo atuante é a adsorção que se limita as características específicas do local como densidade, textura, pH, fluxo de águas subterrâneas, matérias orgânica e minerais argilosos (RICHTER e THEIS, 1980 *apud* ATSDR, 2005). O descarte de resíduos que contém o elemento são as principais fontes para o solo, enquanto outra importante fonte são as cinzas e partículas da atmosfera que se depositam nos solos próximos às regiões industriais (ATSDR, 2005).

## 1.15 PRATA

A prata (Ag) pode ser liberada tanto por mecanismos naturais quanto artificiais na atmosfera (na forma de partículas finas), nos solos, ambientes aquáticos e alimentos (por meio da deposição úmida e seca e sorção). Este metal é transportado como aerossóis em partículas em estado sólido ou líquido no ar. As principais formas metálicas presentes na

atmosfera são carbonato, sulfeto, sulfato e halogenetos de prata (SMITH e CARSON, 1977 apud ATSDR, 1990). Essas partículas, quando maiores que 20 µm de diâmetro, podem ser emitidas por atividades como a moagem na mineração, de forma que se depositam próximas a fonte. Se forem menores que 20 µm de diâmetro, elas podem ser emitidas por fundição, incineradores de resíduos sólidos e usinas de energia movidas por combustível fóssil e levadas para distante das fontes, depositadas por precipitação (SCOW et al. 1981 apud ATSDR, 1990).

No solo e na água, a prata também é transportada como partículas e sua mobilidade depende do pH. Em condições redutoras os compostos são o sulfeto de prata e o metal livre, enquanto em condições oxidantes são brometos, cloretos e iodetos (LINDSAY e SADIQ, 1979 apud ATSDR, 1990). No ambiente aquático a prata está presente como íons monovalentes (por exemplo, na forma de sais de sulfato, bicarbonato ou sulfato) e como íons complexos (por exemplo, na forma de cloretos e sulfatos), além de poder estar integrada ou adsorvida em material particulado (BOYLE, 1968 apud ATSDR, 1990).

No solo, a mobilidade da Ag pode ser influenciada pela reatividade com complexos de ferro e manganês, a depender do pH e do potencial de redução e de oxidação, podendo imobilizar a SQI. Outros fatores que influenciam a mobilidade da prata no solo são o potencial de drenagem, que controla a quantidade de prata que pode ser removida, e a presença de matéria orgânica, que complexa junto à prata, reduzindo sua mobilidade (BOYLE, 1968 apud ATSDR, 1990).

## 1.16 SELÊNIO

Na atmosfera, o selênio (Se) se particiona como compostos inorgânicos (dióxido de selênio e seleneto de hidrogênio) e compostos orgânicos (dimetil seleneto e dimetil diseleneto). Alguns são altamente reativos no ar, como o seleneto de hidrogênio, que é oxidado em selênio (NAS, 1976a apud ATSDR, 2003). Na atmosfera ocorre principalmente na forma inorgânica de dióxidos de selênio (IV) em partículas carregadas pelo vento. Fontes antropogênicas consistem nas queimas de carvão e incineração de resíduos municipais. Há ainda a contribuição de microrganismos biometiladores de selênio no solo, causando a volatilização do mesmo e o lançando à atmosfera. O seleneto



rapidamente tende a se quebrar para selênio elementar, enquanto os outros compostos como os orgânicos, tendem a permanecer suspensos por mais tempo (ATSDR, 2003).

O ingresso de Se na água está amplamente associado às partículas do solo ou da atmosfera, que são trazidos aos corpos da água por correntes ou por ações antropogênicas, pelos descartes industriais. Nas águas superficiais ou nas zonas freáticas, espera-se encontrar o selênio na forma de sais de selênio ou ácido selênico. O seleneto sódico é um dos compostos mais móveis e de baixa taxa de adsorção no solo. Ainda, o elemento na forma de selenitos (IV) tende a ser menos solúvel do que na forma de selenatos (VI) (ATSDR, 2003).

As principais fontes de selênio no solo são pela lixiviação das rochas basais e minerais que o contém, bem como pelas partículas suspensas na atmosfera que se depositam no solo (ATSDR, 2003). O transporte é controlado pelo pH e Eh. Se estiver na forma elementar, o Se é insolúvel (NAS, 1976b *apud* ATSDR, 2003). Em solos ácidos e com alta concentração de matéria orgânica, as formas que predominam são os selenetos de metais pesados e sulfetos de selênio. Como esses compostos são insolúveis, a SQI fica imóvel no solo, enquanto as selenidas possuem solubilidade, mesmo que baixa, e podem ser transportadas. Em ambientes alcalinos e bem oxidados predominam os selenatos, que são altamente solúveis, possibilitando a mobilidade da SQI em questão (ATSDR, 2003).

## 1.17 VANÁDIO

O Vanádio (V) pode chegar à atmosfera, de forma natural, por meio de poeira continental, aerossol marinho e vulcânico. Já as fontes antropogênicas estão relacionadas à combustão de combustíveis pesados, especialmente em usinas de petróleo, refinarias e caldeiras industriais e carvão (ATSDR, 2012). Naturalmente, encontra-se na forma de partículas minerais, mais frequentemente na forma trivalente que é menos solúvel (BYERRUM *et al.* 1974; ZOLLER *et al.* 1973 *apud* ATSDR, 2012). Por maneiras antropogênicas, o V é emitido como óxido de vanádio simples ou complexo (BYERRUM *et al.* 1974 *apud* ATSDR, 2012). Quando em transporte, esse elemento é facilmente alterado, principalmente se for por longas distâncias, sendo eventualmente transferido para o solo e para a água superficial por dissolução seca e úmida.

Os fatores que controlam o transporte e a partição no solo e na água são: pH, presença de partículas e o potencial redox. Para água doce, em condições redutoras, predomina o íon vanadil ( $V^{4+}$ ), enquanto em condições oxidantes predomina o íon vanadato ( $V^{5+}$ ) em solução ou adsorvidos no material particulado (WEHRLI e STUMM, 1989 *apud* ATSDR, 2012). Na interface água-sedimentos a partição é controlada pela presença das partículas presentes na água que se ligam com grande força por adsorção aos minerais (WEHRLI e STUMM, 1989 *apud* ATSDR, 2012), em que o transporte se dá por suspensão ou solução (ATSDR, 2012). Já em água salgada, como nos oceanos, o vanádio chega em suspensão ou adsorvido, depositando-se no fundo onde é extraído por processos de adsorção, absorção e processos bioquímicos (OMS, 1988 *apud* ATSDR, 2012). Naturalmente, a introdução de vanádio na água se dá pela deposição úmida e seca, erosão do solo e lixiviação de rochas e solos. As liberações antropogênicas na água são muito menores que as fontes naturais e incluem a lixiviação do resíduo de minérios, argilas, escórias enriquecidas com vanádio, lodo de esgoto urbano e certos fertilizantes, todos sujeitos a drenagem de chuva e água subterrânea, além de lixiviados de tanques de cinzas e preparação de resíduos de carvão (ATSDR, 2012).

Em relação ao vanádio presente no solo, a maior parte é proveniente das rochas originais em que os principais meios de transporte são os hidróxidos férricos e betumes sólidos (orgânicos) (ATSDR, 2012). O Vanádio trivalente tem afinidade com o ferro trivalente e, por isso, o ferro atua com transportador do vanádio (ATSDR, 2012). O pH do solo é o principal mecanismo que controla a mobilidade do vanádio nesse meio. Em pH neutro ou alcalino, esse elemento é bastante móvel. Já em condições insaturadas e oxidantes, a mobilidade é baixa e se torna imóvel em condições reduzidas e saturadas (VAN ZINDEREN BAKKER e JAWORSKI, 1980 *apud* ATSDR, 2012). No solo tem como fonte natural a intemperização de minerais de vanádio em rochas, precipitação de partículas de vanádio da atmosfera, deposição de partículas em suspensão de água e resíduos de plantas e animais. As fontes antropogênicas incluem o uso de fertilizantes com materiais que contém vanádio, bem como a disposição de resíduos industriais, como pilhas de escória e rejeitos de minas (ATSDR, 2012).

## 1.18 ZINCO



Na atmosfera, o zinco (Zn) possui tamanhos de partículas variáveis dependendo da fonte e ocorre junto a aerossóis que podem ser ligados a partículas presentes no solo. O zinco presente na atmosfera é relativamente baixo, exceto quando próximo a fontes industriais. A concentração do metal no ar de áreas rurais varia de 10 a 100 ng/m<sup>3</sup> e em áreas urbanas de 100 a 500 ng/m<sup>3</sup> (ATSDR, 2005). Quando estão no ar, as partículas de zinco estão sob a forma oxidada e tendem a ser transportadas pelo vento, dependendo da densidade e tamanho, e são removidas por deposição seca e úmida (ATSDR, 2005).

No ambiente aquático, o Zn ocorre no estado de oxidação +2 e é facilmente dissolvido em ácidos formando cátions Zn<sup>2+</sup> hidratados e em bases fortes, formando ânions de zinco. Nas águas superficiais, Zn pode ocorrer de forma suspensa e dissolvida. Caso ocorra na forma suspensa, pode ser dissolvido com mudanças nas condições da água como pH e potencial redox ou absorver matéria que esteja em suspensão. Caso esteja na forma dissolvida, pode ocorrer de forma hidratada como zinco livre ou complexos e compostos dissolvidos (ATSDR, 2005). Além disso, por meio da sorção, pode se decompor em sedimentos ou sólidos em suspensão nas águas superficiais, principalmente em ferro hidratado e óxidos de manganês, matéria orgânica e minerais de argila. O que controla o transporte na água são as espécies de ânions e a estabilidade depende do pH (ATSDR, 2005).

Em relação ao solo, a mobilidade do zinco no solo depende do pH do meio, potencial redox, capacidade de troca catiônica, espécies químicas presentes no solo, condições aeróbicas ou anaeróbicas, formas especiadas do elemento e das propriedades do solo (ATSDR, 2005). O zinco é componente comum e natural de solos, mas sua concentração pode ser ampliada por descartes de resíduos e efluentes industriais ou minerários. O teor em solo geralmente está em torno de 300 mg/kg de peso seco e no sedimento de até 100 mg/kg (ATSDR, 2005).



## 2. ANÁLISE DE TOXICIDADE

A avaliação de toxicidade caracteriza a relação entre a magnitude da exposição a uma SQI e a natureza e magnitude de efeitos adversos à saúde que podem resultar de tal exposição. Os critérios de toxicidade para uso em avaliação de risco podem ser baseados em dados epidemiológicos, estudos de exposição humana em curto prazo ou estudos de toxicidade subcrônica ou crônica em animais.

A toxicidade química é dividida em duas categorias, carcinogênica e não carcinogênica, com base no tipo de efeito adverso exercido sobre a saúde. Os riscos à saúde são calculados de modo diferente para esses dois tipos de efeitos, porque seus critérios de toxicidade são baseados em mecanismos de suposições diferentes e expressos em unidades diferentes.

Para análise da toxicidade no presente estudo, as SQIs foram selecionadas de modo a abranger concentrações significativas que possam apresentar riscos à saúde humana e ambiental.

### 2.1 INDICADORES DE TOXICIDADE: EFEITOS NÃO CARCINOGENICOS

Um efeito não carcinogênico é definido como qualquer resposta adversa a um composto químico que não seja câncer. Qualquer composto químico pode causar efeitos adversos à saúde se administrado numa dose suficientemente alta. Quando a dose é suficientemente baixa nenhum efeito adverso é observado. Assim, para caracterizar os efeitos não carcinogênicos de um composto químico, o parâmetro chave é a dose limite a partir da qual o primeiro efeito adverso torna-se evidente.

A dose limite é tipicamente estimada a partir de dados toxicológicos (derivados de estudos em humanos e/ou animais) pela determinação da dose mais alta que não produz um efeito adverso observável à saúde (o “Nível Sem Efeito Adverso Observado” - “*No-Observed-Adverse-Effect-Level*” [NOAEL]) ou se não houver um NOAEL disponível, a dose mais baixa na qual um efeito adverso é observado (o “Nível Mais Baixo de Efeito Adverso Observado” - “*Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level*” [LOAEL]). Visando

assegurar proteção a receptores potenciais particularmente sensíveis, avaliações de risco não carcinogênico não são baseadas diretamente no nível limite de exposição, mas num valor mais baixo (mais restritivo) referido como a Dose de Referência (RfD).

A RfD é definida como uma estimativa do nível diário de exposição durante toda a vida (expressa em unidades de mg de composto químico/kg de massa corpórea/dia), incluindo subgrupos sensíveis, que provavelmente seja isenta de risco apreciável de efeitos deletérios (USEPA 1989a). Similarmente, concentrações de referência (RfCs) são concentrações no ar (em unidades de mg/m<sup>3</sup>) que representam uma exposição que provavelmente seja isenta de risco apreciável de efeitos deletérios. As RfDs e RfCs são usualmente derivadas partir de NOAELs (ou LOAELs, se NOAELs confiáveis não estão disponíveis) a partir de estudos nas espécies mais sensíveis, linhagens e sexo do animal experimental, com base na suposição de que os humanos são tão sensíveis quanto as espécies mais sensíveis que fizeram parte dos experimentos com animais. Estes critérios incorporam uma série de fatores de incerteza que representam a variabilidade entre e intra-espécies e a qualidade e a integridade do banco de dados toxicológicos:

Animais a humanos;

- (a) Altos níveis experimentais até níveis de efeitos nulos em humanos;
- (b) Durações de exposição de curto até longo prazo;
- (c) Diferenças entre indivíduos (subpopulações sensíveis);
- (d) Suficiência do banco de dados;
- (e) Fator modificante (incertezas adicionais).

A cada um desses fatores de incerteza é designado um valor de 1 a 10. Se estudos em humanos estão disponíveis e as observações consideradas confiáveis, o fator de incerteza pode ser tão pequeno quanto 1. Aos fatores de incerteza nunca é alocado um valor menor do que 1, mesmo quando se sabe que os humanos são menos sensíveis do que espécies animais sob teste.

Dividindo-se o NOAEL ou o LOAEL pelo produto de todos os fatores de incerteza, assegura-se que o RfD ou o RfC não é mais alto do que o limite ou o NOAEL na espécie animal mais sensível testada. Desse modo, há uma “margem de segurança” embutida na RfD ou na RfC e, doses iguais ou menores que a RfD ou a RfC são virtualmente certas

de não apresentar nenhum efeito adverso em humanos. Enquanto a probabilidade de um efeito adverso aumenta em doses maiores do que a RfD ou a RfC, é importante reconhecer que, diferentemente da avaliação de risco de câncer sem limite, este aumento não representa uma probabilidade estatística de efeito adverso.

Outro indicador de efeitos não carcinogênicos é o Nível de Risco Mínimo (*Minimum Risk Level – MRL*). Conforme apresentado pelas Diretrizes (MS, 2010):

*“O Nível de Risco Mínimo (Minimal Risk Level - MRL) é definido como uma estimativa de exposição diária humana a uma substância perigosa que provavelmente não trará risco apreciável de efeito adverso diferente de câncer, considerando uma duração específica de exposição (aguda de 1 a 14 dias; intermediária de 15 a 364 dias; e crônica de 365 dias ou mais) para uma determinada via de exposição. O MRL foi criado para dar ideia do perigo que representa cada substância. Exposições acima do MRL não significam que ocorrerão efeitos adversos. É um indicador de perigo e quer dizer que exposições até esse nível provavelmente não acarretarão efeito adverso inclusive à pessoa mais sensível. O MRL é baseado no NOAEL do estudo que menor dose utilizou para verificar o efeito adverso, associado aos graus de incerteza. Quando se dispõe de informações suficientes de diversos estudos em animais, em diversas espécies, é utilizado o NOAEL. O MRL é produzido dividindo-se o NOAEL pelos fatores de incerteza. Em geral, quando se usa o NOAEL, os fatores de incerteza são dois, agregando um fator 10 pela extrapolação de animais para humanos e outro fator 10 pela variabilidade e suscetibilidades humanas”.*

Ressalta-se que a utilização das RfD e MRL como doses de referências é recomendada pelas diretrizes do Ministério da Saúde na avaliação de Risco, e, todas as premissas de utilização desses valores devem ser seguidas.



## 2.2 INDICADORES DE TOXICIDADE: EFEITOS CARCINOGENÉTICOS

Cânceres são geralmente definidos como doenças de mutação, afetando o crescimento e a diferenciação das células. A evidência da carcinogenicidade de um composto químico em humanos é derivada de duas fontes: estudos crônicos em animais de laboratório e estudos de epidemiologia em humanos, nos quais uma incidência aumentada de câncer está associada a uma exposição (usualmente ocupacional) ao produto químico.

A abordagem da USEPA para avaliar riscos humanos associados à exposição à carcinógenos sofreu mudanças significativas desde sua origem nos anos 1980. Notadamente, a orientação anterior para esse processo (USEPA 1986) foi recentemente substituída por uma abordagem significativamente diferente baseada nos extraordinários progressos na compreensão científica da carcinogênese (USEPA 2005a). Em contraste aos efeitos não carcinogênicos, a suposição da política tradicional da USEPA era a de que não há limite para respostas carcinogênicas, isto é, era considerado que qualquer dose de um carcinógeno introduz algum risco finito de câncer. Além disso, era assumido tipicamente que dados epidemiológicos negativos, quando há dados positivos em animais, não constituem evidência de não carcinogenicidade em humanos.

Modelos matemáticos são usados para extrapolar desde as altas doses experimentais até as baixas doses no meio ambiente, pois os riscos a baixos níveis de exposição normalmente encontrados por humanos são difíceis de quantificar diretamente, tanto por estudos em animais ou epidemiológicos. A inclinação da curva extrapolada de dose oral resposta é usada para calcular o fator de inclinação do câncer oral (SF0), que define o risco incremental de câncer durante a vida por unidade de carcinógeno (em unidades de risco por mg/kg-dia). Para exposições de inalação, a inclinação da curva extrapolada de dose-resposta é usada para calcular o Fator Unidade de risco (URF), em unidades por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

O modelo multi-estágio linearizado para extrapolação de baixa dose mais frequentemente usado pela USEPA no passado (USEPA 1986) é um dos mais conservadores disponíveis e leva a uma estimativa de risco na faixa alta (o UCL 95% da inclinação da dose-resposta animal modelada). Sob a suposição de linearidade dose-resposta sem limite, a probabilidade de que a potencialidade verdadeira seja maior que a



estimada é, assim, de apenas 5%. É provável que a potencialidade efetiva (e o risco resultante) seja menor e poderia, eventualmente, ser zero.

A orientação presente para avaliação de risco carcinogênico possibilita a derivação de relações dose-resposta usando procedimentos de extrapolação de baixa dose resposta biologicamente mais significativos, conforme indicado pela natureza e qualidade do banco de dados (USEPA 2005a). Mais importante ainda, é agora geralmente aceito que (1) alguns tipos compostos químicos podem causar câncer por meio de um modo de ação não linear, tipo limite; (2) alguns tipos de câncer em roedores ocorrem por modos de ação que não funcionam em humanos; e (3) precisam ser levadas em consideração importantes diferenças de espécies em farmacocinética e susceptibilidade. Ademais, na ausência de dados farmacocinéticos, a extrapolação entre espécies é agora baseada em (peso corpóreo), em vez de área superficial, que sozinha resultaria numa redução de duas a quatro vezes nas estimativas de risco.

Apenas poucos compostos químicos, sofreram processo rigoroso de reavaliação, necessária para estimar seu potencial de carcinogenicidade humana, devido à nova orientação que foi recentemente finalizada. Assim, os SFs e URFs existentes para todas as SQIs estimados para a avaliação de risco foram desenvolvidos usando a metodologia superada.





### 3. TOXICIDADE DOS METAIS À SAÚDE HUMANA

#### 3.1 PERFIS TOXICOLÓGICOS

A seguir são apresentados os perfis toxicológicos, toxicocinética, bioacumulação, efeitos adversos à saúde humana, mecanismos de toxicidade e limites estabelecidos para as SQI selecionadas, para correlacioná-las com as formas de exposição, seus respectivos receptores e potenciais efeitos nos organismos.

##### 3.1.1 ALUMÍNIO

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta (PARK *et al.* 2014) sendo encontrado na natureza em ligações com oxigênio e sílica na forma de minerais que compõem os solos e rochas, encontrado em minerais silicáticos como o feldspato. Seu principal minério é a bauxita, e a partir da extração do alumínio metal e seus compostos, a gama de utilizações é vasta, como recipientes, painéis, folhas, abrasivos, antiácidos e aditivos químicos.

##### 3.1.1.1 PERFIL TOXICOLÓGICO

Sob certas condições físicas atípicas, como por exemplo, insuficiência renal (gerada pelo aumento da carga de alumínio), os níveis desse elemento podem causar toxicidade em humanos. Nessas condições o sistema nervoso central e os tecidos ósseos podem ser os principais afetados (ATSDR, 2008).

A aluminose, também descrita como a pneumoconiose do alumínio metálico, pode ocorrer quando há inalação deste metal na forma de pó. Porém, raros são os casos desta doença, em função das melhorias das condições as quais os trabalhadores estão expostos ao alumínio. Também pode ocorrer pneumoconiose, conhecida como doença de Shaver, que está associada à inalação de poeiras durante o processo abrasivo de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



A pneumoconiose pode ainda ser atribuída como causa da concentração de sílica livre presente em tais processos, bem como da exposição a outros materiais particulados, potencialmente fibrogênicos, nos locais de trabalho que empregam processos abrasivos (Mendes, 2003).

O potencial neurotóxico do alumínio não está claramente estabelecido. Em estudos conduzidos com animais, observou-se degeneração neurofibrilar dos neurônios motores do cérebro e da medula espinhal, com alterações nos dendritos e no pericárdio relacionados ao edema axonal. Nos casos de intoxicação severa ao alumínio, pode-se observar o aparecimento de convulsões (MENDES, 2003).

### 3.1.1.2 TOXICOCINÉTICA

A exposição oral, inalatória e dérmica gera pouca absorção do alumínio. Aproximadamente 0,1 a 0,6% do alumínio ingerido é absorvido. A biodisponibilidade do alumínio é, fortemente, influenciada pela presença de constituintes da dieta que podem formar complexos com o metal e, assim, aumentar ou inibir a sua absorção. O alumínio associa-se a diversos ligantes no sangue e se distribui para todo o corpo, com maiores concentrações descritas nos tecidos ósseo e pulmonar. O alumínio é excretado, principalmente, na urina e, em menor grau, na bile (ATSDR, 2008).

O alumínio pode formar complexos com diversas moléculas no corpo (ácidos orgânicos, aminoácidos, nucleotídeos, fosfatos, carboidratos, macromoléculas). Muitos compostos de alumínio têm produtos de baixa solubilidade, portanto, seus radicais livres ocorrem em concentrações muito baixas. A toxicocinética do Al pode variar, dependendo da natureza desses complexos. Por exemplo, o alumínio ligado a um complexo de baixo peso molecular poderia ser filtrado nos glomérulos renais e excretado, enquanto o alumínio em um complexo de alto peso molecular (transferrina de alumínio) não seria filtrado (ATSDR, 2008).

### 3.1.1.3 BIOACUMULAÇÃO



O Alumínio vem sendo descrito como possível agravante de algumas doenças, como o Alzheimer e a osteomalácia (amolecimento ósseo). É também apontado como mediador de estresse oxidativo e por interromper a secreção do hormônio paratireoide. Alguns relatos também indicam que o alumínio afeta os rins e aumenta o risco de câncer de mama (Peto *et al.* 2010).

Estudos demonstraram que os níveis de alumínio em tecidos humanos estão positivamente correlacionados com a idade dos homens, ou seja, há um aumento exponencial da concentração do metal com a idade. Esse resultado pode indicar que uma exposição diária (em concentrações que o corpo não consegue excretar) resulta em sua acumulação nos tecidos (PETO *et al.* 2010).

O Alumínio pode-se bioacumular em diversas matrizes animais e vegetais, mas seu potencial de causar efeitos tóxicos em humanos, precisa ser mais estudado para se obter respostas mais claras quanto às possíveis consequências do contato direto.

### **3.1.1.4 EFEITOS ADVERSOS À SAÚDE HUMANA**

#### CARCINOGENICIDADE

Os estudos de carcinogenicidade realizados em animais não encontraram aumento relevante da formação de tumores malignos (ATSDR, 2008; KREWSKI *et al.*, 2007). Com base em evidências atuais, a Agência Internacional para Pesquisa sobre Câncer (IARC) declarou que “os estudos epidemiológicos disponíveis fornecem evidência limitada de que determinadas exposições ocupacionais ao alumínio sejam carcinogênicas para o homem, sendo a bexiga e os pulmões, os principais órgãos-alvo” (IARC, 2012).

#### TOXICIDADE REPRODUTIVA

Há informações limitadas sobre o potencial de indução de efeitos reprodutivos relacionados ao alumínio. Apesar de diversos estudos não terem reportado alterações nos parâmetros reprodutivos e na prole, nenhum deles avaliou os potenciais efeitos na fertilidade e/ou na morfologia e mobilidade do esperma (ATSDR, 2008).

#### TOXICIDADE PARA ÓRGÃOS-ALVO ESPECÍFICOS APÓS EXPOSIÇÃO ÚNICA

Dados de exposição ocupacional no homem sugerem que o trato respiratório, principalmente os pulmões, e o sistema nervoso são os potenciais alvos de toxicidade do alumínio, após a exposição por inalação a fumos e poeiras deste metal (ATSDR, 2008).

#### TOXICIDADE PARA ÓRGÃOS-ALVO ESPECÍFICOS APÓS EXPOSIÇÃO CRÔNICA

Estudos conduzidos em animais e dados de exposição ocupacional sugerem que, após a exposição por inalação a grandes quantidades de fumos e poeiras de alumínio, os principais órgãos-alvos são os pulmões e o sistema nervoso. Assim, a inalação de pós/fumos de alumínio pode levar à fibrose pulmonar, pneumoconiose e funções respiratórias alteradas e efeitos no sistema nervoso (ATSDR, 2008; HSDB, 2010).

Níveis de alumínio em concentrações próximas dos limites ocupacionais, mas ainda em valores relatados como seguros, foram responsáveis por causar alterações hipotálamo-hipofisárias transitórias em indivíduos expostos ocupacionalmente. Inicialmente, os níveis de TSH (hormônio estimulante da tireoide) reduziram de forma não significativa, retornando ao normal depois de meses, por provável mecanismo de adaptação (Mendes, 2003).

Vários efeitos neurotóxicos do alumínio foram induzidos em organismos teste, variando de alterações neurocomportamentais e de neurodesenvolvimento após repetidas exposições pela via oral em camundongos e ratos até alterações patológicas neurodegenerativas no cérebro causadas por administração parenteral aguda (ATSDR, 2008).

#### CRIANÇAS

Crianças com deficiência renal podem vir a apresentar problemas ósseos ou cerebrais. O alumínio acumulado no estômago causa deficiência na absorção de fosfato, que é fundamental para o crescimento saudável de ossos. Não há estudos concretos sobre efeitos do alumínio durante a gestação e desenvolvimento do ser humano (ATSDR, 2008).

### **3.1.1.5 MECANISMOS DE TOXICIDADE**

#### OSSOS



Após exposição ao alumínio, ocorre sua ligação ao fósforo proveniente da dieta e prejudicando sua absorção gastrointestinal. A osteomalácia e o raquitismo estão diretamente relacionados à diminuição da carga corporal de fosfato. Em pacientes de diálise, expostos ao alumínio via fluido de diálise ou medicação para controlar hiperfosfatemia, os níveis de alumínio ósseo estão marcadamente aumentados e o alumínio está presente entre a junção do osso calcificado e não calcificado. A osteomalácia é caracterizada pelo aumento do tempo de latência da mineralização, superfície osteoide e área osteoide, níveis relativamente baixos de hormônio da paratireoide e níveis séricos de cálcio levemente elevados (ATSDR, 2008).

### NEUROTOXICIDADE

Certos animais, como coelhos, gatos, furões e primatas já manifestaram alterações em neurônios cerebrais (agregação de neurofilamentos hiperfosforilados), gerados pelo alumínio em diferentes formas de exposição em que foram introduzidos. Alterações patológicas neurofibrilares semelhantes foram associadas a vários distúrbios neurodegenerativos, sugerindo que a causa da função neuronal anormal relacionada ao alumínio pode envolver mudanças nas funções da proteína do citoesqueleto nas células afetadas. Os agregados neurofilamentosos parecem resultar principalmente de fosforilação alterada, aparentemente por modificações pós-traducionais na síntese de proteínas, mas também podem envolver proteólise, transporte e síntese. As interações entre esses processos provavelmente contribuem para a indução dos neurofilamentos fosforilados. Cada processo pode ser influenciado por quinases, algumas ativadas por sistemas de segundo mensageiro. Por exemplo, o alumínio parece influenciar a homeostase do cálcio e os processos dependentes de cálcio no cérebro por meio do enfraquecimento do sistema de produção de segundo mensageiro de fosfoinositídeo, o qual modula as concentrações de cálcio intracelular; proteinases ativadas por cálcio podem ser afetadas, o que poderia alterar a distribuição e concentração de proteínas do citoesqueleto. Outro processo que é gerado a partir dessa neurodegeneração é a apoptose (ATSDR, 2008).

Em espécies de roedores, foram observados efeitos neurocomportamentais induzidos pelo alumínio, como alterações na atividade locomotora, na aprendizagem e memória, mas não apresentaram desenvolvimento de uma patologia citoesquelética significativa, apenas uma série de alterações neuroquímicas após a exposição *in vivo* ou *in vitro*. Os estudos conduzidos nestes animais indicam que a exposição ao alumínio pode afetar a



permeabilidade da barreira hematoencefálica, atividade colinérgica, vias de transdução de sinal, peroxidação lipídica, e prejudicam a via neuronal do glutamato-óxido nítrico-GMP cíclico, bem como interfere no metabolismo de oligoelementos essenciais (ATSDR, 2008).

### **3.1.1.6 LIMITES DO ALUMÍNIO**

#### **3.1.1.6.1 NÍVEIS MÍNIMOS DE RISCO (MINIMAL RISK LEVELS) – MRLS**

Para o alumínio, foram determinados os seguintes valores de MRL:

- MRL (oral de duração intermediária) = 1 mg Al/kg/dia foi derivado para exposição oral de duração intermediária (15-364 dias) ao alumínio (ATSDR, 2008).
- MRL (oral de duração crônica) = 1 mg Al/kg/dia foi derivado para exposição oral de duração crônica ( $\geq 1$  ano) ao alumínio (ATSDR, 2008).

#### **3.1.1.6.2 DOSES DE REFERÊNCIA**

##### DOSES DE REFERÊNCIA - HEALTH EFFECTS ASSESSMENT SUMMARY TABLES (HEAST)

Não há dados adequados para determinação das doses de referência crônica e subcrônica para o alumínio (US EPA, 1999).

##### DOSES DE REFERÊNCIA - US EPA'S IRIS PROGRAM

As doses de referência foram retiradas de um estudo empregando ratos, com um tempo de duração de 2 anos, tendo como via de exposição a oral e empregou o fosfeto de alumínio. Os efeitos avaliados referiam-se a alterações no peso corpóreo e em parâmetros clínicos. O fator de dose de Referência diária foi de 0,0004 mg/kg/dia, com um fator de incerteza de 100. A dose (LOAEL) foi de 0,51 mg/kg,dia ou 0,025 mg/kg/dia (fosfina) e quando convertido em fosfeto de alumínio 0,043 mg/kg/dia.

##### VALORES DE REFERÊNCIA BASEADOS NA ATSDR E EPA, EMPREGADOS NOS CÁLCULOS DE RISCO

- MRL (oral e crônico) = 1,00E+00 mg/Kg/dia
- RfDd = 1,00E+00 mg/Kg/dia

### 3.1.2 ANTIMÔNIO

O antimônio é um metal branco prateado utilizado principalmente como liga metálica para produção de baterias, soldas ou artefatos metálicos. O trióxido de alumínio é um componente de garrafas PET. O elemento é um componente natural dos solos, mas pode ser encontrado em sulfetos como a estibinita. É um componente pouco relevante na crosta terrestre (cerca de 0,2 a 0,3 ppm).

#### 3.1.2.1 PERFIL TOXICOLÓGICO

A maioria dos dados toxicológicos disponíveis para o antimônio diz respeito ao antimônio trivalente, em particular ao trióxido de antimônio (ATSDR, 2017). A toxicidade do antimônio é uma função da solubilidade em água e do estado de oxidação das espécies sob consideração. Em geral, antimônio trivalente é mais tóxico do que o pentavalente e os compostos inorgânicos são mais tóxicos do que os orgânicos (WHO, 2003).

Após administração intraperitoneal, intravenosa e/ou intramuscular, principalmente do tartarato de potássio ou de sódio de antimônio (compostos trivalentes), compostos utilizados como medicamentos, foram observados diversos efeitos adversos, tais como vômitos, diarreia, cólicas abdominais, dores musculares e nas articulações e toxicidade cardíaca (ATSDR, 2017). Os sais solúveis de antimônio, após administração oral, exercem um severo efeito irritante na mucosa gastrintestinal e desencadeiam vômitos contínuos. Os sintomas agudos são similares àqueles vistos após intoxicação aguda por arsênico (WHO, 2003).

Os efeitos adversos para o homem foram observados pelas vias oral, dérmica e inalatória, sendo esta última o alvo predominante de toxicidade do antimônio. Os pulmões são os alvos primários de toxicidade pela via inalatória e os efeitos são observados após exposições a curto, médio e longo prazo (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTER, 2017). A absorção inalatória crônica de pós contendo antimônio

leva à irritação do trato respiratório e danos ao miocárdio e fígado (WORLD HEALTH ORGANISATION, 2003).

Após exposição inalatória ao pentacloro e tricloro de antimônio, observou-se rinite e, em exposições severas, edema pulmonar agudo como parte da toxicidade aguda destes compostos. Na exposição crônica, via inalatória, a outros compostos de antimônio, observou-se rinite, faringite, traqueíte e a longo prazo, bronquite e eventualmente pneumoconiose com doença obstrutiva dos pulmões e enfisema (LIU *ET AL.*, 2008).

### 3.1.2.2 TOXICOCINÉTICA

A população humana está exposta por meio de ingestão de água e alimentos contaminados. Embora dados quantitativos da absorção do antimônio não estejam disponíveis para suas diferentes formas, estipula-se um valor de 10% para o tartarato de antimônio e 1% para as outras formas, como valores de referência para a absorção gastrointestinal em humanos (ATSDR, 2017). Estudos de absorção do antimônio por via oral indicam que sua absorção é relativamente baixa. Mesmo em formas solúveis, o antimônio não é prontamente absorvido no trato gastrointestinal, independentemente do estado de valência (WHO, 2003). Além disso, considera-se que a absorção gastrointestinal do antimônio pode ser saturável. A comparação de concentrações sanguíneas, 24hs após administração de 100 e 1000 mg/kg de trióxido de antimônio, encontrou uma diferença de apenas 2 vezes, mesmo havendo uma diferença de 10 vezes entre as doses (ATSDR, 2017). Por causa da baixa absorção via oral, os medicamentos à base de antimônio devem ser administrados via parenteral (IPCS, 1996).

Em relação à exposição inalatória, as partículas de antimônio inaladas e depositadas no trato respiratório são sujeitas a 3 processos de distribuição, dependendo do diâmetro das partículas: 1) transporte mucociliar branqueal e traqueal até o trato gastrointestinal (diâmetro  $> 5\mu\text{m}$ ); 2) transporte para os linfonodos torácicos (ex. pulmão, traqueobranquial e mediastino) (diâmetro  $\leq 5\mu\text{m}$ ) ou 3) absorção sanguínea e pela linfa e transferência para outros tecidos (ex. tecidos linfáticos periféricos, fígado, rim) (diâmetro  $\leq 5\mu\text{m}$ ) (ATSDR, 2017).

O antimônio dissolvido é absorvido e alcançará a circulação sanguínea, sendo que a taxa de absorção dependerá da sua solubilidade. A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICPR - *International Commission on Radiological Protection*) considera





que os óxidos, hidróxidos, hálides, sulfetos, sulfatos e nitratos de antimônio sejam classe W e todos os outros compostos classe D. As classes D e W são aquelas que apresentam taxas de eliminação no trato respiratório de dias e semanas, respectivamente (ATSDR, 2017).

Não foram encontrados estudos referentes à absorção dérmica do antimônio em humanos. Em relação à distribuição, níveis muito baixos de antimônio foram encontrados em homens não expostos, pós-morte. Em animais, após exposição inalatória, as maiores concentrações de antimônio foram encontradas nos pulmões, trato gastrointestinal, fígado, rim e esqueleto. Observou-se também que os níveis de antimônio trivalente aumentaram mais rapidamente no fígado do que o pentavalente. Também, após exposição ao antimônio trivalente, os níveis eritrocitários estavam elevados, diferentemente do ocorrido para o pentavalente, onde os níveis plasmáticos estavam elevados, após exposição inalatória, o que demonstra que a partição entre eritrócitos e plasma é uma função da valência (ATSDR, 2017; IPCS, 1996; Liu *et al.*, 2008).

Após exposição oral em animais, os maiores locais de acúmulo, fora do trato gastrointestinal, foram: fígado, rim, ossos, pulmões, baço e tireoide, e até mesmo na pele e no cabelo, em menor extensão (WHO, 2003; ATSDR, 2017; Liu *et al.*, 2008).

Como o antimônio é um metal, não é metabolizado, podendo interagir covalentemente com grupos sulfidrilas e fosfato, assim como ter numerosas ligações reversíveis com ligantes endógenos (ex. proteínas). Não se pode afirmar que essas interações são causem efeitos significativos. Há dados limitados da ocorrência de conversão *in vivo* da forma pentavalente para trivalente (ATSDR, 2017; WHO, 2003). O antimônio III (na forma de trihidróxido de antimônio) pode passar facilmente pelas membranas celulares devido à falta de carga elétrica. Esta pode ser a razão pela sua maior meia-vida de eliminação (94h) comparada com o antimônio V (24hs) (WHO, 2003).

Quanto à eliminação, níveis urinários elevados de antimônio foram observados em trabalhadores expostos principalmente ao antimônio trióxido. Em animais, o antimônio foi excretado via urinária e fecal. Parte do antimônio excretado via fezes, pode representar a porção não absorvida que chegou ao trato gastrointestinal pela ação mucociliar, após exposição inalatória, por conta do tamanho das partículas. A depuração do tartarato de antimônio trivalente ou pentavalente é bifásica. Um dia pós-exposição, 65 e 60% da carga corporal inicial do antimônio trivalente e pentavalente, respectivamente, foi excretada. A meia-vida da fase lenta foi de aproximadamente 16 dias (ATSDR, 2017).





Pelo fato de o antimônio ser parcialmente absorvido por via oral, considera-se que a excreção fecal seja uma importante via de eliminação do antimônio ingerido, em humanos. A porção absorvida pode ser eliminada via urinária ou fecal, de forma variável, dependendo da forma química ingerida (ATSDR, 2017). A forma pentavalente é predominantemente excretada na urina, enquanto o antimônio trivalente é conjugado com a glutatona e excretada via biliar e, portanto, encontrado principalmente nas fezes (Liu *et al.*, 2008).

### 3.1.2.3 BIOACUMULAÇÃO

Apesar de ser um elemento que possui baixa abundância no ambiente, é uma substância considerada como poluente prioritário em alguns países. Seu comportamento ambiental ainda é pouco entendido e há poucas evidências quanto ao seu comportamento de bioacumular (Fu *et al.* 2011).

Um estudo realizado em uma área de mineração de antimônio demonstrou que plantas da região acumulam mais substância em suas folhas, fato que foi relacionado à exposição atmosférica. Em minas abandonadas esse fato não se repetiu (Fu *et al.* 2011).

Nesse estudo, não pode ser observada a biomagnificação desse elemento, indicando que mesmo com o acúmulo no indivíduo, ele não vai seguir, de forma significativa, na cadeia alimentar (Fu *et al.* 2011).

Outro estudo avaliou a concentração do metal em organismos presentes no solo de uma área abandonada de mineração, demonstrando que existe uma tendência do antimônio sofrer uma maior absorção biológica (Gal *et al.* 2007).

Existe a necessidade de mais estudos que possa demonstrar o seu comportamento e interação com o meio, bem como sua biodisponibilidade, que poderá indicar o qual a capacidade que essa substância tem de causar algum efeito.

### 3.1.2.4 EFEITOS ADVERSOS À SAÚDE HUMANA

### CARCINOGENICIDADE

A maior preocupação relacionada à carcinogenicidade dos compostos de antimônio está relacionada com a via inalatória. O trióxido de antimônio tem demonstrado ser carcinogênico para organismos teste, e capaz de causar danos pulmonares diretos após inalação crônica (como uma consequência de uma sobrecarga de partículas insolúveis). Entretanto, após exposição via oral, não houve indicação, de que o antimônio (trivalente), tenha potencial carcinogênico (ATSDR, 2017). Contudo, estes estudos foram considerados inapropriados para avaliar o potencial carcinogênico.

Desta forma, existem evidências inadequadas de carcinogenicidade do trióxido e do trissulfeto de antimônio, mas ambos têm sido associados com o aparecimento de câncer pulmonar em ratos. O trióxido de antimônio é classificado como possível carcinogênico para o homem (grupo 2B) e o trissulfeto de antimônio classificado no grupo 3, não classificado quanto à carcinogenicidade para o homem (IARC, 1989; Sundar, S.C, 2010; ATSDR, 2017).

### TOXICIDADE SISTÊMICA

O trato respiratório é o órgão-alvo mais sensível de toxicidade do antimônio por via inalatória, demonstrado tanto por estudos epidemiológicos quanto pelos estudos em animais. Os pulmões parecem ser a porção mais sensível do trato respiratório, sendo que a severidade dos efeitos respiratórios parece ser concentração e duração dependente.

A exposição ao antimônio, na forma de aerossol, resulta em deposição de partículas nos pulmões, que leva a um aumento no número de macrófagos alveolares, inflamação e fibrose. Este aumento alveolar e intra-alveolar de macrófagos é o efeito inicial, e mais sensível, do antimônio inalado. A proliferação de macrófagos é uma resposta fisiológica normal da deposição de partículas insolúveis nos pulmões e este aumento por si só, na ausência de evidência de danos pulmonares, não é considerado adverso. O aumento na deposição de antimônio nos pulmões também resulta em aumento no tempo de meia-vida de depuração pulmonar, não somente pela sobrecarga volumétrica, mas por uma toxicidade intrínseca do antimônio (trióxido) (ATSDR, 2017).

Após exposição ao antimônio, observam-se alterações degenerativas no miocárdio e anormalidades do eletrocardiograma (elevação nos segmentos RS-T e achatamento das ondas T) em diversas espécies (ATSDR, 2017).

Uma variedade de sintomas gastrointestinais foi relatada em trabalhadores envolvidos em atividades que incluíam exposição aguda ao tricloreto de antimônio e

exposição crônica ao trissulfeto de antimônio ou óxido de antimônio. Estes sintomas incluíam dores abdominais, diarreia, vômitos e úlceras. Porém, uma relação causal não foi estabelecida porque os trabalhadores estavam expostos aos diversos outros agentes químicos, além do antimônio (ATSDR, 2017).

### MUTAGENICIDADE

A genotoxicidade do antimônio trivalente e pentavalente tem sido avaliada em diversos estudos *in vitro* e *in vivo* em várias espécies e sistemas teste (ATSDR, 2017). Os resultados dos estudos de genotoxicidade *in vitro* são controversos e mostram desde resultados negativos até resultados positivos para a quebra de cromossomos em leucócitos humanos. Num estudo para avaliar o risco genotóxico e danos oxidativos em trabalhadores expostos ao trióxido de antimônio, não foi observado diferenças na troca de cromátides irmãs e micronúcleos entre o grupo tratado e o controle, contudo, danos oxidativos foram observados no grupo tratado. Em outro trabalho, o antimônio mostrou genotoxicidade tanto em teste de mutação bacteriana como no de aberração cromossômica. Porém, devido à ausência de estudos adequados *in vivo*, a genotoxicidade para o homem não pode ser determinada (SUNDAR, 2010; LIU *et al.*, 2008).

### CRIANÇAS

Não há estudos suficientes para correlacionar a exposição de antimônio aos efeitos na saúde de crianças. Pesquisas com trabalhadores, mais suscetíveis à poeira com antimônio e animais, parecem demonstrar um retardo no crescimento infantil, porém os não há evidências concretas.

## **3.1.2.5 MECANISMOS DE TOXICIDADE**

O mecanismo de ação do antimônio não é bem estabelecido, mas parece envolver a disrupção das proteínas tiol, por meio da ligação com grupos sulfidril (IPCS, 1996).

Em função da cardiotoxicidade observada para o antimônio, alguns estudos *in vitro* investigaram danos aos miócitos, que resultam em morte celular e alterações, e que podem levar às anormalidades nos eletrocardiogramas e arritmias. As possíveis alterações bioquímicas nos miócitos cardíacos incluem: disrupção da homeostase do tiol celular, particularmente depleção de glutatona, indução de peroxidação lipídica e ligação com

tiols vicinais, tal como piruvato desidrogenase. Subsequentemente, a inibição do piruvato desidrogenase leva a um decréscimo nos níveis de ATP celular.

Todas estas alterações bioquímicas contribuem para a morte celular. Adicionalmente, o tartarato potássico de antimônio desregula a homeostase de cálcio nos miócitos. Observou-se um influxo reduzido e um efluxo aumentado de cálcio, o que pode ser responsável pela resposta cardíaca diminuída observada nos estudos *in vivo*. Também foi observado que o antimônio trivalente aumenta a corrente de cálcio cardíaco, resultando num prolongado potencial de ação; isso causa um atraso na repolarização cardíaca, que pode explicar o prolongamento no intervalo QT observado no eletrocardiograma e arritmias em humanos, que administraram antimônio no tratamento de leishmaniose (ATSDR, 2017).

### 3.1.2.6 LIMITES DE ANTIMÔNIO

#### 3.1.2.6.1 NÍVEIS MÍNIMOS DE RISCO (MINIMAL RISK LEVELS) – MRLS

Estimativas de níveis de exposição que representam risco mínimo para o homem (MRLs) foram feitas para o antimônio (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTER, 2017).

PARA O ANTIMÔNIO, FORAM DETERMINADOS OS SEGUINTE VALORES DE MRL:

- MRL (inalatório agudo - curta duração) = 0,001 mg Sb/m<sup>3</sup> foi derivado para exposição inalatória de duração aguda (duração <14 dias) ao antimônio; fator de incerteza: 30; *endpoint*: respiratório (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTER, 2017;2019).

- MRL (inalatório - duração intermediária) = 0,001 mg Sb/m<sup>3</sup> foi derivado para exposição inalatória de duração aguda (duração <14 dias) ao antimônio; fator de incerteza: 30; *Endpoint*: respiratório (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTER, 2017;2019).

- MRL (inalatório - duração crônica) = 0,0003 µg Sb/m<sup>3</sup> foi derivado para exposição inalatória de duração crônica (≥1 ano) ao antimônio; fator de incerteza: 30;