



Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Licenciatura em Química Ambiental

Trabalho de Licenciatura

TEMA:

**Avaliação da Contaminação do Ar e Água por
Mercúrio e Seus Possíveis Impactos Ambientais em
Zonas de Mineração de Ouro na Província de Tete nos
Distritos de Chiúta e Moatize**

Autor:

André Benaldo Johane Siteo

Maputo, Junho de 2024



Faculdade de Ciências

Departamento de Química

Licenciatura em Química Ambiental

Trabalho de Licenciatura

**Avaliação da Contaminação do Ar e Água por
Mercúrio e Seus Possíveis Impactos Ambientais em
Zonas de Mineração de Ouro na Província de Tete nos
Distritos de Chiúta e Moatize**

Autor: André Benaldo Johane Siteo

Supervisora: Mestre Noor Gulamussen

Co-Supervisor: Mestre Sérgio Pina Chibute

Maputo, Junho de 2024

AGRADECIMENTOS

A prova que agora apresento não é resultado de um trabalho individual, mas fruto de um trabalho de uma equipa que teve o privilégio de ser orientada pela Mestre Noor Gulamussen e pelo Mestre Sérgio Pina Chibute.

Ao iniciar estas linhas vêm à mente nomes de tantas pessoas (professores, colegas, amigos) as quais de uma forma ou de outra fico a dever um agradecimento e, por recear esquecer-me de alguém, digo-lhes apenas que estou grato a todos.

À minha mãe Mariana Salvador Tivane e ao meu pai José Johane Siteo, tudo o que agradeço e lhes devo, nem conseguiria escrevê-lo. Aos meus irmãos Nelson Siteo, Cláudio Siteo e Alcília Siteo pelo incentivo e motivação.

Aos meus grandes amigos Pedro, Mulimo, Edimilson (meu advogado), Silva, endereço-lhes o meu agradecimento pelo incentivo, compreensão, pelo carinho e motivação.

Aos meus colegas da academia, em especial o Tito Fato, Nelson Pedro, Abenilde Fulano, Nasiah Gentivo, Malva Sando e Nanília Mate, a todos os docentes do curso de Licenciatura em Química Ambiental/Industrial pelos conhecimentos transmitidos durante a formação.

À Mestre Noor Gulamussen, minha orientadora, transmito o meu reconhecimento e gratidão pela sua disponibilidade e incentivo na condução dos trabalhos que constituem esta tese. Agradeço todos os ensinamentos, apoio ilimitado, paciência e amizade. Obrigado pela confiança que depositou em mim. Foi uma honra trabalhar consigo.

Ao Mestre Sérgio Pina Chibute, meu co-orientador, agradeço a ajuda incondicional durante a elaboração desta tese, a sua disponibilidade constante para me ajudar e um obrigado especial pela sua paciência.

A todos que de certa forma, não foram aqui citados endereço a minha profunda gratidão!

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, André Benaldo Johane Siteo, declaro que este trabalho submetido para obtenção do título de licenciado em Química Ambiental, foi unicamente por mim elaborado, com base nos recursos mencionados ao longo do mesmo.

Maputo, Junho de 2024

O autor

(André Benaldo Johane Siteo)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Au: Ouro

Hg: Mercúrio

Hg²⁺: Mercúrio divalente

µg: Micrograma

ng: Nanograma

kg: Quilograma

L: Litros

LC: Limite de confiança

cm³: Centímetros cúbicos

MISAU: Ministério da Saúde

WHO: “World Health Organization” - Organização Mundial da Saúde

CV AAS: “Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry” - Espectrometria de absorção atômica de vapor frio

CVAFS: “Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry” - Espectrometria de fluorescência atômica com vapor a frio

ICP-MS: “Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry” - Espectrometria de massa com plasma acoplado

ZAAS: “Zeeman Atomic Absorption Spectrometry” - Espectrometria de absorção atômica com correção Zeeman

RESUMO

O mercúrio é um metal pesado que representa uma grande ameaça ao meio ambiente e à saúde humana, mesmo em baixas concentrações sendo que as actividades humanas são a principal fonte de introdução desse metal no ambiente. Para a análise da contaminação foram colectadas amostras de água em 9 locais em recipientes plásticos e colheu-se numa profundidade que variou de 20 a 30. Foram determinadas as concentrações de mercúrio na água e no ar, utilizando um analisador de mercúrio LUMEX RA-915M acoplado ao RP-92. Os resultados deste estudo demonstram que as águas das bacias de Chiúta e Moatize estão contaminadas por mercúrio, mas somente em Chiúta no povoado de Cató obteve-se valores acima do estabelecidos pela com o Decreto-Lei nº67/2010-Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes(2.000 ng/L), os pontos de amostragem 10 e 11 com níveis de Hg variando de $4.170,67 \pm 9,40$ e $2.453,00 \pm 8,96$ ng/L, respectivamente e os restantes locais de amostragem (Povoado de Machinga e Cató para Chiúta e povoado de Nhamtamula e Kanchoere) apresentaram valores abaixo variando de $44,94 \pm 10,29$ a $1.587,20 \pm 11,68$ ng/L. Foi possível detectar o mercúrio em águas dos poços nos dois distritos, os níveis de contaminação em todos pontos de amostragem em Moatize e Chiúta encontram-se abaixo de 1000 ng/L, valor estabelecido pelo diploma ministerial nº 180/2004 de 15 de Setembro para água destinada ao consumo humano, variando de $0,17 \pm 0,38$ a $23,97 \pm 3,76$ ng/L e $32,50 \pm 8,64$ a $154,57 \pm 7,01$ ng/L, respectivamente. Em relação aos níveis de mercúrio em águas dos poços, observou-se que praticamente todos os pontos de amostragem apresentam contaminação por Hg que variam, que variam de $0,67 \pm 1,43$ a $31,00 \pm 2,48$ para Moatize e de $2,90 \pm 1,27$ a $51,33 \pm 7,59$ ng/L para Chiúta, Tais valores encontram-se abaixo do estabelecido pelo diploma ministerial nº 180/2004 de 15 de Setembro. Ademais, os níveis de Hg no ar variam de 0 a 3.170 ng/m³, onde a maior parte dos pontos encontraram-se acima de 25 ng/m³, valor recomendado pela Organização Mundial da Saúde para locais de trabalho, excepto os pontos 2, 3, e 8 onde os valores detectados estavam abaixo do de 25 ng/m³. E ouve um ponto onde a concentração do Hg foi mais de 15 vezes maior em relação aos outros. Após a análise, os resultados do estudo permitiram concluir que a água e o ar apresentam na maioria dos pontos teores de mercúrio acima dos limites máximos estabelecidos.

Palavras-chave: Mercúrio, Mineração, artesanal, Chiúta, Moatize

Índice

AGRADECIMENTOS	i
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	iii
RESUMO.....	ii
ÍNDICE DE TABELAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
1. Introdução	1
1.1. Objectivos.....	3
1.1.1. Objectivo geral.....	3
1.1.2. Objectivos específicos	3
1.2. Justificativa.....	3
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1. Descrição do local de estudo.....	2
2.2. Mercúrio (Hg)	3
2.3. Ocorrência do mercúrio.....	3
2.3.1. Natural.....	3
2.3.2. Antropogénica.....	4
2.4. Propriedades do mercúrio.....	4
2.5. Ciclo do mercúrio.....	4
2.5.1. Bioquímica do Hg.....	6
2.6. Toxicidade de mercúrio e eventos relacionados.....	7
2.7. Impactos Ambientais	9
2.7.1. Impactos decorrentes do uso do Hg.....	10
2.7.2. Mercúrio e a saúde humana	11

2.7.3.	Mercúrio e carcinogénese.....	14
3.	Metodologia.....	2
3.1.	Amostragem.....	2
3.2.	Metodologia de análise.....	3
3.3.	Analisador Hg RA-915M.....	4
3.3.1.	Princípio de funcionamento	4
3.3.2.	Acessório RP-92	5
3.3.2.1.	Princípio de funcionamento	5
3.4.	Parte Experimental.....	
3.4.1.	Materiais e reagentes	6
3.4.2.	Materiais	6
3.4.3.	Equipamentos.....	6
3.4.4.	Reagentes	6
3.5.	Técnicas experimentais – Análises laboratoriais	7
3.5.1.	Determinação de mercúrio.....	7
4.	Apresentação e Discussão dos resultados.....	9
4.2.	Níveis de mercúrio na água.....	10
4.3.	Comparação com outros estudos.....	13
4.4.	Concentração de mercúrio no ar.....	14
5.	Conclusões e Recomendações	15
5.1.	Conclusões	15
5.2.	Recomendações	16
6.	Referências Bibliográficas.....	17
Anexos	22

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Absorção e adsorção de diferentes formas de mercúrio pelo corpo humano	13
Tabela 2: Métodos mais frequentemente utilizados para a quantificação de mercúrio e seus respectivos limites de detecção(Barbour, 2007; Micaroni et al., 2000).....	3
Tabela 3: Sequência de adição e os volumes dos reagentes para o procedimento de digestão pelo permanganato de potássio	7
Tabela 4: Concentração de Hg em soluções preparadas a partir do SRM de Hg.....	9
Tabela 5: Concentração de Hg em rios internacionais.....	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Província de Tete.....	2
Figura 2: Distrito de Moatize.....	2
Figura 3: Distrito de Chiúta.....	3
Figura 4: Ciclo do mercúrio no ambiente(Beckers & Rinklebe, 2017).....	5
Figura 5: Processos e mecanismos envolvidos no ciclo global do Hg na biosfera (Drude de Lacerda, 2005)	6
Figura 6: Mineiros do distrito de Chiúta durante as suas actividades	9
Figura 7: A coloração das águas do rio Mavudze.....	10
Figura 8: Efeitos de intoxicação pelo mercúrio decorrente da actividades de mineração.....	12
Figura 9: Mapa dos pontos de amostragem.....	2
Figura 10: Princípio de operação do analisador RA-915M(LUMEX, 2015b).....	4
Figura 11: Analisador de mercúrio RA-915M acoplado ao acessório RP-92(Sholupov et al., 2004)	5
Figura 12: Concentração de Hg em amostras de água em bacias.....	10
Figura 13: Concentração de Hg em amostras de água em rios.....	11
Figura 14: Concentração de Hg em amostras de água em poços	12
Figura 15: Concentração de mercúrio no ar no distrito de Moatize	14

1. Introdução

A mineração é a primeira etapa para a utilização económica dos recursos minerais. Esta é definida como a extracção de material do solo, a fim de obter um ou mais componentes do material extraído (Lottermoser, 2010). Tal como qualquer actividade desenvolvida pelo Homem, a mineração tem impactos no meio ambiente. Os principais impactos da mineração podem ocorrer antes, durante e após a operação e podem incluir: remoção de vegetação, criação de grandes vazios, pilhas de resíduos, barragens de rejeitos e contaminação de águas tanto superficiais como subterrâneas (Fetter, 2001; Lottermoser, 2010).

A poluição causada por resíduos industriais é um dos maiores desafios ambientais que enfrentamos na era pós-moderna. O rápido crescimento populacional e o subsequente desenvolvimento industrial têm resultado em um uso cada vez mais acentuado de metais pesados, especialmente em países em desenvolvimento. Essa tendência tem impactos sérios na saúde humana e no meio ambiente, o que torna crucial a busca por soluções sustentáveis para enfrentar essa questão premente (Vareda et al., 2019).

A extracção mineral é uma das principais causadoras de poluição por metais pesados, acarretando graves danos ao meio ambiente. A nível global, estima-se que cerca de 2.220 toneladas de mercúrio são lançadas no meio ambiente por diferentes indústrias, com aproximadamente 32,74% desse total proveniente da mineração artesanal. Esses dados ressaltam a urgência de abordar as práticas de mineração de maneira sustentável e responsável para atenuar os impactos adversos sobre a natureza (Santos, 2013).

Moçambique tem um enorme potencial em recursos minerais. Como resultado, a indústria mineira no país tem vindo a crescer, e espera-se que cresça muito mais nos próximos anos. A Província de Tete tem um grande potencial em carvão, ouro, prata, ferro, entre outros (MIREME, 2017), actuando lá empresas nacionais e multinacionais. A exploração destes recursos influencia, directa e indirectamente, a qualidade da água nos rios, poços, ar, solos e nos cursos de água subterrânea associados.

A poluição por mercúrio decorrente da actividade da mineração artesanal, tem sido objecto de estudo no mundo. A actividade extractiva mineral altera o meio ambiente, tornando-se fonte de degradação, quando empreendida sem as medidas de controle adequadas.

O mercúrio é um elemento químico considerado não essencial a qualquer processo metabólico; entretanto, é facilmente acumulado na maioria dos organismos. Ocorre naturalmente em formas orgânicas e inorgânicas, não só no estado sólido ou dissolvido, mas também na fase gasosa. Consequentemente seu ciclo biogeoquímico envolve processos que ocorrem no solo, na água e na atmosfera (Windmöller et al., 2007).

A mobilidade e reatividade do Hg no meio ambiente dependem da forma em que ele se encontra. O mercúrio metálico lançado no meio ambiente é volátil, podendo ser oxidado e metilado para a forma mais tóxica, o metil-mercúrio, incorporando-se em organismos vivos pela cadeia alimentar. Dessa forma, pode ocasionar sérios danos à saúde dos animais e do ser humano.

Estima-se que aproximadamente 100 mil indivíduos, tanto nacionais quanto estrangeiros, estejam directamente envolvidos na prática da mineração artesanal de ouro em Moçambique. Lamentavelmente, a maior parte dessa actividade é conduzida de maneira ilegal e clandestina, com maior ocorrência nas províncias de Manica, Tete, Niassa, Nampula e Cabo Delgado, as quais apresentam um expressivo potencial mineral. Essa realidade suscita considerações relevantes acerca da regulamentação, sustentabilidade e impacto nas comunidades locais. (Mapurango, 2014)

1.1. Objectivos

1.1.1. Objectivo geral

- ❖ Avaliar a contaminação do ar e da água por mercúrio em zonas de mineração de ouro na província de Tete e seus impactos ambientais, visando a preservação da saúde pública e dos ecossistemas locais.

1.1.2. Objectivos específicos

- ❖ Validar a técnica de absorção atómica com o analisador de mercúrio Lumex RA-915M na determinação do Hg na água;
- ❖ Determinar o teor de mercúrio em amostras dos corpos líquidos superficiais em zonas próximas da extracção do ouro;
- ❖ Determinar o teor do metal mercúrio no ar nas diferentes áreas de extracção do ouro;
- ❖ Comparar os valores obtidos a partir dos ensaios com os valores estabelecidos pela legislação vigente;

1.2. Justificativa

O uso de mercúrio na mineração artesanal de ouro na província de Tete, no centro de Moçambique, vem poluindo os rios e os solos, libertando mercúrio no meio ambiente e colocando em risco a saúde das pessoas e do meio ambiente. Conforme relatório da Organização Mundial da Saúde, a prática ilegal de garimpo de minérios e a libertação de efluentes não tratados pelas indústrias são os principais factores que contribuem para a introdução de metais pesados no meio ambiente.

A justificativa para o trabalho é a seguinte: A convenção de Minamata é um tratado internacional que visa proteger a saúde humana e o meio ambiente dos efeitos adversos do mercúrio, promovendo medidas para reduzir as emissões desse metal, bem como para gerir os níveis e os resíduos existentes. O Plano Nacional de Redução do Mercúrio é uma iniciativa do governo de Moçambique para implementar as disposições da convenção de Minamata no país, tendo em vista os desafios e as oportunidades relacionados ao uso do mercúrio, principalmente na actividade de mineração artesanal e de pequena escala de ouro. O trabalho que se propõe faz parte do projecto de implementação deste plano.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Descrição do local de estudo

Tete é uma província da região central de Moçambique. A sua capital é a cidade de Tete, localizada a cerca de 1.570 km a norte da cidade de Maputo, a capital do país. Com uma área de 100.724 km² e uma população de 2.764.169 habitantes em 2017, esta província está dividida em 15 distritos e possui, desde 2022, cinco municípios. A província é atravessada pelo rio Zambeze e é na sua parte média que se encontra a barragem de Cahora Bassa. (Ministério da Administração Estatal, 2014a)



Figura 1: *Província de Tete*

A província de Tete tem cerca de 23 biliões de toneladas de reservas de carvão, na sua maioria inexploradas e ainda está nos estágios iniciais de um enorme desenvolvimento de recursos naturais. De acordo com os dados de 2012 do governo, as concessões e licenças de exploração de minerais cobrem aproximadamente 3,4 milhões de hectares, ou 34% da área da província de Tete. Tete é a 3^a maior província do país, depois de Niassa e Zambézia, localiza-se entre as coordenadas 14°00'S e 17°42'01" de latitude sul, e 35°20'07" e 30°13' de longitude Este, e faz fronteira com três países, nomeadamente as Repúblicas de Zâmbia, Malawi e Zimbabwe. O presente estudo foi realizado nos distritos de Moatize e Chiúta, Província de Tete, Moçambique (Figuras 2 e 3).

Moatize é uma cidade da província de Tete em Moçambique, sede do distrito do mesmo nome. A superfície do distrito é de 8.462 km² e a sua população está estimada em 292 mil habitantes à data de 1/7/2012. Com uma densidade populacional aproximada de 34,5 hab/km², previa-se que o distrito em 2020 viesse a atingir os 450 mil habitantes (Ministério da Administração Estatal, 2014b). A bacia carbonífera de Benga-Moatize tem uma importância económica fundamental para Moçambique. Várias concessões foram entretanto emitidas para prospecção e exploração de carvão nesta bacia (Ministério da Administração Estatal, 2014b).

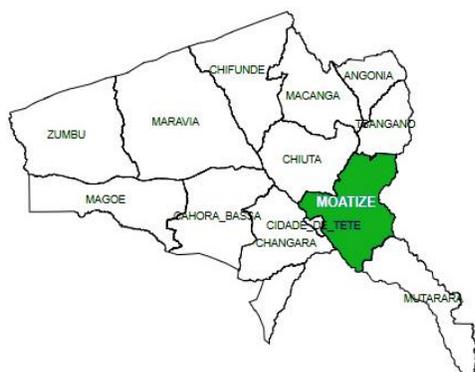


Figura 2: *Distrito de Moatize*

Chiúta é um distrito da província de Tete, com sede na povoação de Manje. Tem limite, a norte com o distrito de Macanga e a sul com o distrito de Changara. A superfície do distrito é de 7.150 km² e a sua população está estimada em 90 mil habitantes à data de 1/7/2012. Com uma densidade



Figura 3: Distrito de Chiúta

populacional aproximada de 12,5 hab/km², previa-se que o distrito em 2020 viesse a atingir os 111 mil habitantes (Ministério da Administração Estatal, 2014a). O distrito possui uma grande variedade de recursos minerais metálicos e não metálicos. Destaca-se a existência de jazidas de ferro, titânio, vanádio, cobre, ouro, volfrâmio e caulino, localizadas nas regiões de Massamba, Chidue, Manchinga e Cotó (Ministério da Administração Estatal, 2014a).

2.2. Mercúrio (Hg)

O mercúrio (Hg) é um metal de cor prateada, líquido à temperatura ambiente, inodoro e não inflamável. O mercúrio pode combinar-se com outros elementos como o cloro, o enxofre e o oxigénio, para formar sais inorgânicos, geralmente pós brancos ou cristais. O mercúrio pode igualmente combinar-se com o carbono para formar compostos de organo-mercúrio que são muito mais perigosos do que o mercúrio elementar (Brenda, 2013).

Devido à sua persistência, capacidade de transporte a longa distância e ao potencial de bioacumulação no ambiente, o mercúrio e seus compostos são considerados poluentes muito perigosos e altamente tóxicos para a vida selvagem, plantas e microrganismos (Windmöller et al., 2007).

2.3. Ocorrência do mercúrio

2.3.1. Natural

O mercúrio ocorre naturalmente no meio ambiente, associado a outros elementos. O mais comum é o enxofre, que juntos formam o minério cinabre (**HgS**), composto de cor vermelha ou preta. Outras fontes naturais de mercúrio são: erupções vulcânicas, evaporação natural e minas de

mercúrio, as quais são responsáveis por emissões de mercúrio da ordem de 2.700-6.000 toneladas/ano (Brenda, 2013).

2.3.2. Antropogénica

O aporte antrópico ocorre através de indústrias que queimam combustíveis fósseis, produção electrolítica de cloro-soda, produção de acetaldeído, incineradores de lixo, polpa de papel, tintas, pesticidas, fungicidas, lâmpadas de vapor de mercúrio, baterias, produtos odontológicos, amalgamação de mercúrio em extração de ouro, entre outros. A emissão de mercúrio das actividades industriais é estimada em 2.000 a 3.000 toneladas/ano pela Organização Mundial de Saúde. Estimativas recentes indicam que das 200.000 toneladas de mercúrio emitidas para a atmosfera desde 1890, por volta de 95% permanecem no solo terrestre, 3% nas águas oceânicas superficiais e 2% na atmosfera (Vareda et al., 2019).

2.4. Propriedades do mercúrio

O mercúrio pode apresentar-se em três estados de oxidação: mercúrio elementar (Hg^0), ião mercuroso (Hg^{1+} ou Hg_2^{2+}) e ião mercúrico (Hg^{2+}). As propriedades e o comportamento químico do Hg dependem do estado de oxidação. A maior parte do Hg na água, solos e sedimentos está na forma inorgânica de Hg (II), enquanto a forma orgânica o metilmercúrio é dominante na biota (Beckers & Rinklebe, 2017). Dentre as aplicações, o mercúrio é utilizado para a produção de termómetros, barómetros e bombas de vácuo. O seu minério mais conhecido, o cinábrio, é encontrado em pinturas antigas, conhecidas pela sua pigmentação vermelha. Todavia, o elemento químico encontra utilidade também para a produção de desinfectantes, na iluminação pública e, no uso dentário, é combinado com ouro e prata para a formação de amálgamas, usados em obturações dentárias. É também usado no garimpo, para separar o ouro. Nesse sentido, esse processo ocasiona a evaporação do mercúrio.

2.5. Ciclo do mercúrio

Define-se como ciclo do mercúrio, o fluxo contínuo de mercúrio entre a atmosfera, a terra e a água. Este ciclo (Figura 4) baseia-se no comportamento do Hg, nos diferentes meios, nas reacções químicas associadas assim como no transporte, transferência e no seu destino final (Gustin et al., 2020).

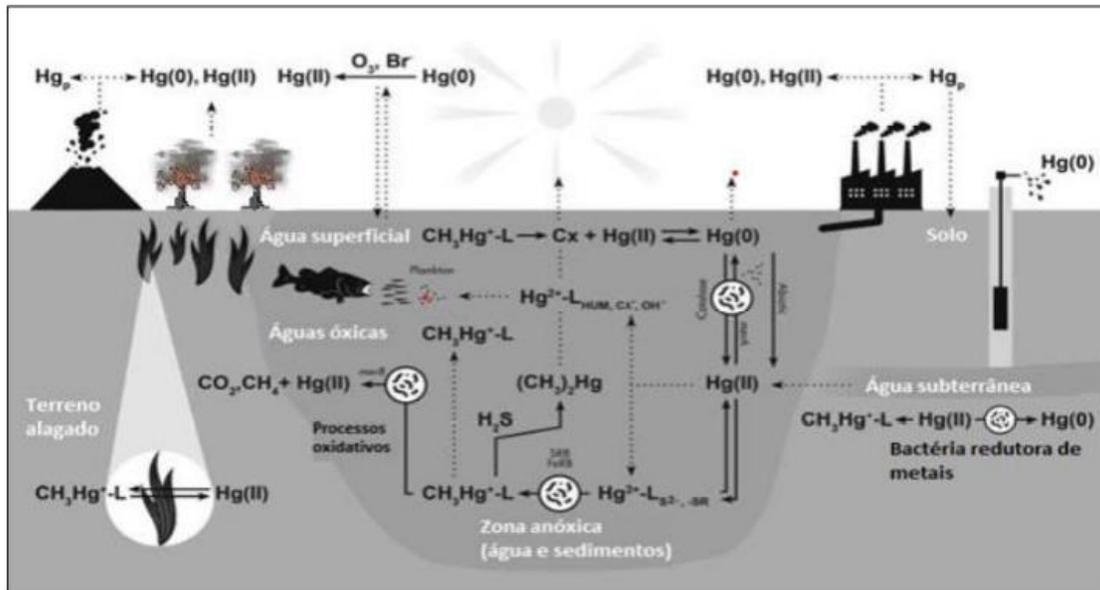


Figura 4: Ciclo do mercúrio no ambiente(Beckers & Rinklebe, 2017)

Em qualquer ponto da terra, a quantidade de mercúrio presente depende:

- ❖ do ciclo global natural;
- ❖ do ciclo global perturbado pela actividade humana;
- ❖ de fontes locais e regionais de mercúrio;

Para dar valores quantitativos a cada ciclo, é necessário conhecer as quantidades de mercúrio presentes nas diferentes reservas terrestres. Estima-se que os oceanos são sem dúvida, os maiores recursos de mercúrio, que se encontra principalmente na forma de HgS. As águas dos oceanos contêm a mesma quantidade que os solos e sedimentos juntos (Gustin et al., 2020).

A biosfera, a atmosfera e as águas terrestres possuem mais ou menos a mesma quantidade de mercúrio. Neste balanço fica excluído o mercúrio presente em minas e outras reservas subterrâneas. É difícil separar as concentrações de mercúrio pela sua origem (antropogénicas ou naturais) devido à contínua mobilidade do elemento no ambiente.

De acordo com a Figura 4, podemos verificar:

- ❖ O mercúrio entra na atmosfera tanto por actividade humana como por fontes naturais;
- ❖ Cerca de metade do mercúrio libertado cai localmente e a outra é transportada sofre alterações químicas e físicas;

- ❖ A deposição local ocorre, na maioria das vezes, como partículas secas, enquanto a deposição global ocorre principalmente por acção da neve ou chuva;
- ❖ Nos ecossistemas marinhos o mercúrio é convertido na sua forma orgânica, por bactérias, através de reacções bioquímicas;
- ❖ O mercúrio nos lagos acumula-se nos peixes que podem ser consumidos directamente pelo homem ou por predadores marinhos.

2.5.1. Bioquímica do Hg

Desde a Revolução Industrial (Final do século XVIII e se estendeu pelo século XIX), o uso generalizado do mercúrio na indústria aumentou significativamente as suas emissões para a atmosfera. A forma como o mercúrio se apresenta nos diferentes ambientes está directamente relacionada à sua forma química original, mas pode sofrer transformações devido ao ciclo biogeoquímico e factores ambientais. Além disso, o ciclo global do mercúrio envolve emissões para a atmosfera a partir de diversas fontes, seguido de dispersão, transporte e deposição no solo ou na água. A partir desses locais, o mercúrio pode ser armazenado ou redistribuído para diferentes compartimentos (Figura 5) ambientais, tornando o ciclo do mercúrio um fenómeno complexo que depende de diversos factores ambientais (Almeida, 2005).

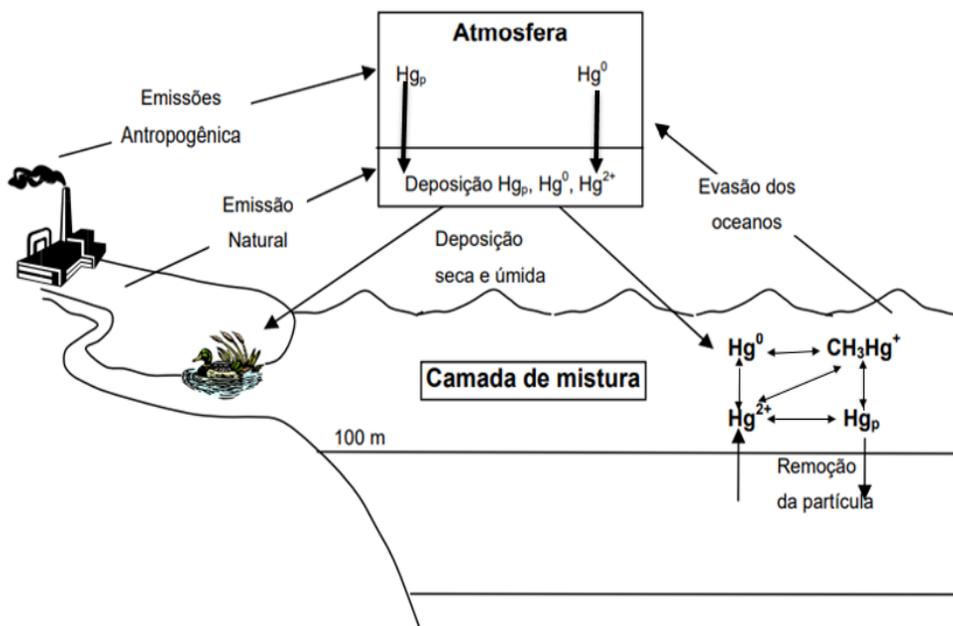


Figura 5: Processos e mecanismos envolvidos no ciclo global do Hg na biosfera (Drude de Lacerda, 2005)

Segundo as pesquisa de Almeida (2005) os principais factores que influenciam o destino e transporte do mercúrio no ambiente são: a forma química do mercúrio na atmosfera, a deposição húmida, a presença do mercúrio em ecossistemas aquáticos e os sedimentos contaminados em rios, lagos e oceanos actuando como um reservatório importante do mercúrio.

2.6.Toxicidade de mercúrio e eventos relacionados

O mercúrio está naturalmente presente no meio ambiente, logo a maior parte da população está exposta a concentrações baixas de mercúrio, mas com o crescente aumento de actividades antropogénicas que têm como base o mercúrio, as pessoas poderão apresentar sinais e sintomas decorrentes da exposição ao mercúrio (Trivelato, 2011).

❖ Hg inorgânico

Os sais inorgânicos de mercúrio são corrosivos para a pele, olhos e trato gastrointestinal e podem induzir toxicidade renal se ingeridos. Distúrbios neurológicos e comportamentais podem ser observados após inalação, ingestão ou aplicação dérmica de diferentes compostos de mercúrio. Os sintomas incluem tremores, insónia, perda de memória, efeitos neuromusculares, dores de cabeça e disfunção cognitiva e motora (WHO, 2021).

A contaminação pelo Hg dá-se principalmente pela inalação dos vapores deste metal, e a exposição ocupacional é a principal forma de contaminação por esta forma química do mercúrio. A exposição ocupacional está principalmente ligada a ambientes de trabalho como a extracção artesanal de ouro, a fábrica de lâmpadas fluorescentes e a fábrica de cloro-soda (Beckers & Rinklebe, 2017).

O vapor do mercúrio metálico é absorvido por inalação através dos pulmões, de onde o mercúrio é levado pelo sangue e distribuído no organismo, acumulando-se nos rins, sistema nervoso central, no fígado, na pele, nas glândulas salivares, no coração, nos músculos e na placenta. O mercúrio elementar, quando inalado e absorvido pelos pulmões pode provocar problemas como a diminuição cognitiva, alterações emocionais, perda de memória a curto prazo, irritabilidade e afastamento social. O Hg⁰ pode permanecer no organismo por várias semanas e a sua eliminação dá-se através da urina, das fezes, saliva e em menor proporções pela expiração (WHO, 2021).

❖ **Hg orgânico**

O mercúrio é libertado na maior parte em garimpos de ouro na forma de vapor, é absorvido pelo organismo humano através do pulmão pelas membranas alveolares a uma proporção de 75 a 80%, quando inalado. No sangue, o mercúrio é oxidado pelos eritrócitos (células vermelhas do sangue) e, uma vez oxidado, o Ião Hg^{2+} é rapidamente distribuído pelo corpo através do sangue, podendo-se ligar também à albumina e à hemoglobina (Vareda et al., 2019).

O primeiro desastre ambiental de repercussão mundial que expôs o risco eminente do mercúrio ocorreu na baía de Minamata em 1953, sudoeste de Japão. A indústria química de Chisso Corporation utilizava sulfato de mercúrio como catalisador para a produção de ácido acético e seus derivados e cloreto de mercúrio como catalisador na produção de cloreto de vinila sendo que o metilmercúrio era um subproduto na síntese do acetaldeído. A "Doença de Minamata" foi oficialmente descoberta em 1956, quando uma criança foi hospitalizada com mãos e pés paralisados (Micaroni et al., 2000; Senderowitz et al., 2011).

Outros acidentes no Irão, Paquistão e Guatemala, causados pelo uso de metilmercúrio como fungicida para tratamento de sementes de grãos, permitem confirmar o problema do uso intensivo de mercúrio, principalmente na forma de compostos orgânomercuriais (Micaroni et al., 2000).

2.7. Impactos Ambientais

O uso disseminado do mercúrio na mineração artesanal (figura 13), especialmente na extracção de ouro, representa um problema sócio ambiental de proporções alarmantes. Essa prática nociva, embora economicamente atractiva para comunidades empobrecidas, desencadeia uma série de consequências devastadoras à saúde humana e ao meio ambiente, exigindo medidas urgentes para a sua erradicação.

O ouro normalmente é encontrado em minérios e sedimentos que contêm toxinas como o mercúrio. Quando os rios são dragados para extrair grandes depósitos de ouro, essas toxinas flutuam rio abaixo e invadem a cadeia alimentar prejudicando o equilíbrio natural.



Figura 6: *Mineiros do distrito de Chiúta durante as suas actividades*

2.7.1. Impactos decorrentes do uso do Hg

A poluição por mercúrio é comum em áreas de garimpo, afectando vastas regiões da província de Tete. Os garimpeiros usam mercúrio para colectar o ouro dos concentrados na forma de uma amálgama e recuperam o ouro metálico “queimando-o”, volatilizando o mercúrio, o qual é levado pelo vento e logo se precipita (Scarpelli, 2003). Pelo desconhecimento técnico-operacional desse processo e pela ausência da cultura para reciclagem do mercúrio em conjunto ao custo relativamente baixo do metal líquido, grandes quantidades de mercúrio têm sido lançadas para água como pode ser visto na figura 13, a supressão da vegetação e o assoreamento dos cursos d’água, pode gerar rejeitos contendo mercúrio metálico e mudança de coloração dos corpos de água (Bermeo, 2001).



Figura 7: *A coloração das águas do rio Mavudze*

O mau uso da terra também pode aumentar os níveis de metilação do mercúrio. A erosão pode transportar o mercúrio para corpos d’água locais e contaminar o lençol freático (Lemos, 2023). Factores, tais como, pH, condutividade eléctrica, disponibilidade de oxigénio, temperatura, actividade biológica e concentração de nutrientes, entre outros, são relevantes nos processos de

organificação do mercúrio e outros metais pesados no solo e na água (Boischio & Barbosa, 1993; Fagerström & Jernelöv, 1972).

2.7.2. Mercúrio e a saúde humana

A população pode-se expor aos compostos de mercúrio pela inalação do ar, pelo consumo de alimentos e água ou pela exposição por contacto com a pele. Também tem sido relatada a contaminação por meio de amálgamas dentários (Pavlogeorgatos & Kikilias, 2013). A imagem a seguir (Figuras15) mostra os diferentes efeitos de intoxicação do homem pelo manuseio de mercúrio.

Tabela 1 Absorção e adsorção de diferentes formas de mercúrio pelo corpo humano

Formas do Mercúrio	Formas de absorção pelo organismo humano
Hg ⁰	A absorção respiratória de elementos de mercúrio é o principal caminho de absorção em humanos (>75-85% do é total captado). Através dos pulmões ele é eventualmente transportado para a corrente sanguínea.
Inorgânico	O grau de absorção do mercúrio inorgânico pelo trato gastrointestinal varia e depende de qual mercúrio o sal está envolvido neste processo (7-15%). A absorção diminui com a diminuição da solubilidade. As estimativas sobre o grau de absorção do mercúrio inorgânico variam, embora seja superior a 20% da a captação total de Hg. Em geral, o Hg bivalente, por ter maior solubilidade que o univalente, é mais absorvido e mais tóxico. Não há dados sobre absorção dérmica.
Metil Mercúrio	O metil-mercúrio é rapidamente e em grande grau absorvível (95%) pelo sistema gastrointestinal. As informações relativas à absorção inspiratória deste composto são limitadas. A percentagem de absorção dérmica é desconhecida (3-5% em animais de laboratório).
R-Hg-R	Há uma pequena absorção pelo sistema respiratório e dérmico, e absorção completa pelo sistema gastrointestinal (isso é verdade para o acetato fenilmercúrio e menos para o metoxi-etil-mercúrio).

Essa distribuição do metal no organismo segundo vários estudos relatados por Pavlogeorgatos & Kikilias (2013), pode gerar uma ampla variedade de efeitos tais como: doenças autoimunes, imunossupressão, anomalias cromossômicas, leucemia, câncer de fígado e de pulmão, infertilidade masculina, morte fetal, malformações congênitas, redução no peso do cérebro, retardação no crescimento, na fala, no caminhar e no desenvolvimento intelectual, deficiência de concentração, insanidade, distúrbios visuais e cegueira, alucinações, tremores, fraqueza muscular, ataxia, paralisia, coma, depressão, dispneia, hipertensão, taquicardia, perda de audição, de memória e da sensibilidade ao toque, gastroenterite, pneumonia e morte

2.7.3. Mercúrio e carcinogénese

A literatura sugere também que a exposição ambiental e ou ocupacional ao mercúrio e a outros metais pesados pode agir como factor desencadeante de formas de neoplasias, por modificação de proteínas, peroxidação de lipídeos e danos ao DNA (Chen et al., 2001). Primariamente, a pele actua como barreira entre o meio ambiente e o organismo e está exposta a uma série de agentes tóxicos, inclusive a metais pesados. Numerosos estudos têm demonstrado a actividade carcinogénica dos metais sobre a pele humana (Baudouin et al., 2002).

A correlação entre o uso de fungicidas mercuriais e a ocorrência de leucemia entre habitantes de áreas rurais foi relatada na literatura. Este achado foi corroborado pela elevada frequência de leucemia linfocítica em gado bovino alimentado com rações contaminadas com estes agrotóxicos (Janicki et al., 1987). As relações entre mercúrio e outros metais pesados com diversas formas de câncer têm-se tornado uma preocupação. Há evidências disso para neoplasias de pele, como já mencionado, pulmão, fígado, rim, baço, cavidade nasal, medula óssea, laringe, intestino e estômago (Ratnaike, 2003).

3.2. Metodologia de análise

A avaliação do impacto dos metais pesados no meio ambiente, devido à sua elevada toxicidade e baixa concentração, especialmente nas massas de água, na vegetação e nos seres humanos, tem conduzido ao desenvolvimento de métodos analíticos para a sua determinação (Barbour, 2007), levando em consideração os seguintes factores: a natureza da amostra e o nível de concentração esperado na mesma. A tabela 1 apresenta algumas técnicas analíticas empregadas na determinação de metais pesados em compostos orgânicos e inorgânicos, juntamente com os seus respectivos limites de detecção (Kasper et al., 2015)

Tabela 2: Métodos mais frequentemente utilizados para a quantificação de mercúrio e seus respectivos limites de detecção (Barbour, 2007; Micaroni et al., 2000)

Método	Limite de Detecção Relatado
Método Colorimétrico	0,01-0,1 µg/g
Espectrometria de Absorção Atômica - Forno de grafite (GF AAS)	1 ng/g
- Vapor frio (CVAAS)	0,01-1 ng/g
Espectrometria de Fluorescência Atômica - Vapor frio (CVAFS)	0,001-0,01 ng/g
Análise por Activação com Neutrões - Instrumental (INAA)	1-10 ng/g
- Radioquímica (RNAA)	0,01-1 ng/g
Cromatografia Gasosa - Detector de Captura Electrónica	0,01-0,05 ng/g
- Detector de Emissão Atômica	~ 0,05 ng/g
- Espectrometria de Massa	0,1 ng/g
- CVAAS / CVAFS	0,01-0,05 ng/g
Cromatografia Líquida de Alta Eficiência - Detector de Ultra-violeta	1 ng/mL
- CVAAS	0,5 ng/ml.
- CVAFS	0,08 ng/mL
- Electroquímico	0,1-1 ng/mL
Plasma Acoplado Indutivamente - Espectrometria de Massa (ICP-MS)	0,01 ng/mL
-Espectrometria de Emissão Atômica (ICP-AES)	2 ng/mL
Espectrometria Foto-Acústica	0,05 ng
Fluorescência de Raios X	5 ng/g - 1 µg/g
Métodos Electroquímicos	0,1-1 µg/g
Analizador de Filme de Ouro	0,05 µg/g

As concentrações do mercúrio total foram obtidas em um espectrómetro de absorção atômica com efeito Zeeman usando um Lumex RA-915 (analizador de Hg) acoplado a um RP-92.

3.3. Analisador Hg RA-915M

O analisador RA-915M foi desenvolvido para a medição da concentração de vapor de mercúrio no ar ambiente, bem como em ambientes residenciais e áreas de produção. Além disso, pode ser empregado na análise de mercúrio em gás natural, emissões de chaminés industriais, água potável, amostras de águas residuais, solos, alimentos, rações, amostras biológicas e produtos de processamento de óleo, seguindo as técnicas estabelecidas (LUMEX, 2015a). Este equipamento oferece diversas vantagens, tais como a capacidade de determinar o mercúrio sem a necessidade de pré-concentração da amostra em amálgama de ouro, a possibilidade de realizar análises de campo sem a utilização de um computador para medição do ar e a capacidade de medir a concentração de Hg em diversas matrizes, incluindo água potável, águas residuais, alimentos, solo, sedimentos, amostras de sangue, urina e outros líquidos. No entanto, é importante considerar algumas desvantagens, tais como a necessidade de controle rigoroso da contaminação e a manutenção do local livre de contaminação por Hg, além da exigência de digestão das amostras no caso de análises líquidas para o método específico (LUMEX, 2015a)

3.3.1. Princípio de funcionamento

A operação do analisador é baseada na espectrometria de absorção atômica diferencial Zeeman usando modulação de alta frequência de polarização de luz (ZAAS-HFM).

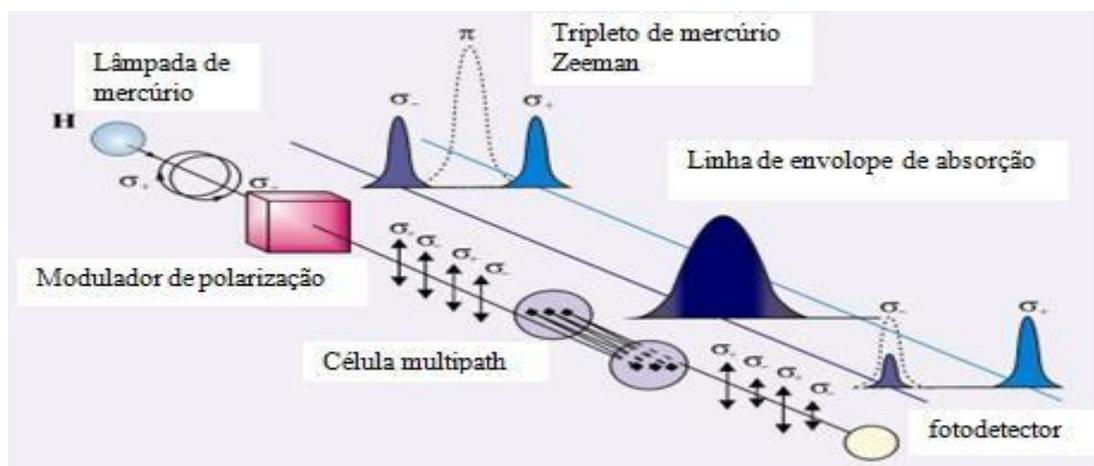


Figura 10: Princípio de operação do analisador RA-915M(LUMEX, 2015b)

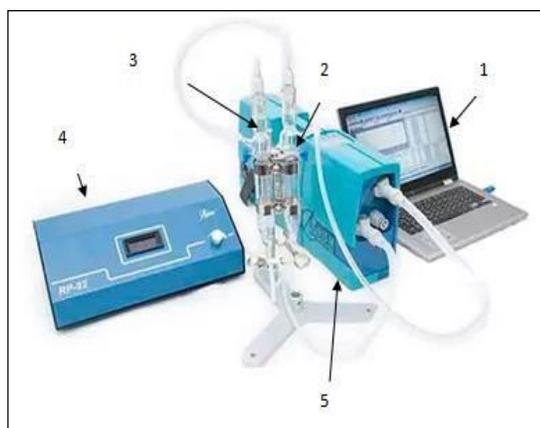
A fonte de radiação (lâmpada de mercúrio) é colocada no campo magnético permanente H (Figura 6) e a linha de ressonância de mercúrio $\lambda = 254 \text{ nm}$ é dividida em três componentes Zeeman polarizados (π , σ^+ e σ^-). Quando a radiação se propaga ao longo da direção do campo magnético,

apenas a radiação dos componentes σ cai dentro do perfil da linha de absorção e atinge o fotodetector e o outro que fica do lado de fora. Quando o vapor de mercúrio está ausente na célula analítica, as intensidades de radiação de ambos os componentes σ são iguais. Quando átomos de mercúrio aparecem na célula, a diferença entre as intensidades dos componentes σ^+ e σ^- aumenta à medida que a concentração de vapor de mercúrio aumenta (LUMEX, 2015a). Normalmente as medições são realizadas em tempo real, dando uma leitura de concentração uma vez por segundo. A determinação de mercúrio em amostras líquidas é realizada, utilizando o analisador RA-915M com acessório RP-92; o princípio de funcionamento é baseado na espectroscopia de absorção atômica de vapor frio-CVAAS; A quantidade de mercúrio emitida é lida pelo RA-915M como um sinal de absorção integrado ao longo do tempo. O tempo de análise é de cerca de 1 minuto por amostra (sem incluir a preparação química).

3.3.2. Acessório RP-92

3.3.2.1. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do acessório RP-92 (Figura 7) é baseado na redução do Hg (II) ao estado atômico usando uma solução redutora com o transporte dos átomos de mercúrio para uma célula analítica por um fluxo de ar (o "vapor frio"). A solução redutora ($\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e a amostra que está sendo analisada são colocadas no mesmo borbulhador. O mercúrio elementar, que é formado durante o bombeamento contínuo de ar através dos borbulhadores, chega à célula analítica do analisador RA-915M, onde são detectados os átomos de mercúrio (LUMEX, 2015c; Sholupov et al., 2004).



- 1-Computador;
- 2-Borbulhador de solução de NaOH;
- 3-Borbulhador da solução de $\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$;
- 4-Acessório RP-92
- 5-Analisador de mercúrio RA 915M

Figura 11: Analisador de mercúrio RA-915M acoplado ao acessório RP-92(Sholupov et al., 2004)

3.4. Parte Experimental

A seguir são descritos os materiais, equipamentos e reagentes utilizados para realização da amostragem e análise das amostras no laboratório de Bioquímica da Faculdade de Medicina da Universidade Eduardo Mondlane.

3.4.1. Materiais e reagentes

Todos os materiais foram lavados primeiro com água da torneira e detergente, depois passados em água destilada para retirar o excesso de detergente e depois imersos em solução de HNO₃ a 20% por no mínimo um dia e depois foram lavados exaustivamente com água destilada e finalmente foram secos. As pipetas que foram regularmente usadas para medir o volume das amostras para as análises, foram depois secas na estufa a uma temperatura máxima de 200°C.

3.4.2. Materiais

- ❖ Máscaras;
- ❖ Luvas;
- ❖ Balões volumétricos Normax (25 mL, 50 mL, 100 mL, 250 mL, 1000 mL);
- ❖ Proveta Normax de 100 mL com precisão de ±1 mL;
- ❖ Pipetas graduadas de (1, 2, 5 e 10 mL);
- ❖ Copos de becker, 50 mL, Normax-Portugal;
- ❖ Erlenmeyer;
- ❖ Seringas;
- ❖ Filtros de 45 µm;
- ❖ Copos de teflon.

3.4.3. Equipamentos

- ❖ Balança analítica (marca Kern ALS, com resolução de 0.1 mg)
- ❖ Analisador de mercúrio (Zeeman RA-915M, LUMEX, Pyro – 92)

3.4.4. Reagentes

- ❖ Água destilada
- ❖ K₂Cr₂O₇ Dicromato de potássio, 99.98% Sigma-Aldrich
- ❖ HNO₃ Ácido nítrico, 65% Pronalab
- ❖ H₂SO₄ Ácido sulfúrico, 97% Unilab
- ❖ SnCl₂·2H₂O Dicloreto de estanho dihidratado, 98% SigmaAldrich
- ❖ NaOH Hidróxido de sódio, 97% Dasitgroup
- ❖ NH₂OH. HCl Cloridrato de hidroxilamina, 97% Associated Chemical Interprece
- ❖ KMnO₄ Permanganato de potássio, 99% Rochelle Chemicals
- ❖ K₂S₂O₈ - Peroxodissulfato de potássio, 99% Sigma-Aldrich
- ❖ Material de referência EVISA, **SRM 1641e** Hg 0,1016 ± 0,0017 (mg/kg)
- ❖ HCl Ácido Sulfúrico 98%

3.5. Técnicas experimentais – Análises laboratoriais

3.5.1. Determinação de mercúrio

Todas as análises de amostras de água passaram por um processo de digestão e filtração com um filtro de membrana de 0,45µm com o objectivo de remover todo o material suspenso para proteger o equipamento, devido à sua sensibilidade. A principal dificuldade encontrada na análise de mercúrio em amostras de água foi o procedimento de limpeza dos recipientes para a realização da digestão. Antes de analisadas, as amostras de água passaram por um processo de digestão com permanganato de potássio para permitir uma análise quantitativa do Hg. Seguiu-se o método de digestão pois este é o mais recomendável para a determinação da concentração de Hg em todos os tipos de água (residual, subterrânea incluindo a do rio). Segundo Torres (2009), o tratamento por digestão com ácidos permite que o Hg seja encontrado na sua forma estável para ser oxidado a Hg^{2+} , e subsequente redução pela solução redutora e posterior análise. A digestão seguiu os seguintes procedimentos: mediu-se 35 mL da amostra de água por analisar, adicionou-se o ácido sulfúrico e o ácido nítrico, e outros reagentes de acordo com a tabela 2 e deixou-se as amostras em repouso por um período de 24 horas para completar a reacção. No dia seguinte, que foi destinado à análise adicionou-se uma solução de cloridrato de hidroxilamina, gota a gota, agitando a solução até tornar-se incolor.

Tabela 3: Sequência de adição e os volumes dos reagentes para o procedimento de digestão pelo permanganato de potássio

Reagentes	Volume
Amostra	35,00 mL
Ácido sulfúrico	3,50 mL
Ácido nítrico	1,00 mL
Permanganato de potássio	2,00 mL
Peroxidossulfato de potássio	1,50 mL
Volume final	50,00 mL

Cada conjunto de análises foi precedido pela preparação de um controle, que consistiu em: um controle de campo, onde em um dos recipientes foi adicionada água destilada que foi armazenada nas mesmas condições das amostras. No laboratório, foi preparado outro recipiente que passou pelo mesmo processo de digestão que as outras amostras e esta amostra foi considerada o controle do laboratório. Foram realizadas três leituras por amostra no analisador de mercúrio. A água foi

analisada no acessório RP-92 que gera vapores de Hg. A concentração de Hg contida nesses vapores foi então medida pelo analisador de mercúrio Zeeman RA-915M.

4. Apresentação e Discussão dos resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais obtidos das análises feitas para a determinação de mercúrio em amostras de água e os resultados de validação do método de Espectrofotometria de Absorção atômica para análise de Hg na água e no ar, sendo expressos em ng/L e ng/m³ respectivamente. Os resultados médios das réplicas foram apresentados com 95 % de nível de confiança.

A tabela 3 apresenta os resultados das análises do branco e dos materiais de referência da água. A recuperação analítica para o material padrão variou de 97,07 a 102,33% (Tabela 3). A EPA (1974), admite valores de recuperação para a determinação de Hg em água no intervalo de 85-115%, portanto esta recuperação pode ser considerada como aceitável.

Tabela 4: Concentração de Hg em soluções preparadas a partir do SRM de Hg

Material de referência (ppt)	Média ± LC (ng/L)	Recuperação (%)
10	10,23±4,06	102,33
100	98,50±15,89	98,50
500	486,17±30,64	97,23
1000	970,67±49,97	97,07

Graficamente, são apresentados os resultados experimentais obtidos das análises feitas às amostras de água e no ar com o objectivo de avaliar o seu nível de contaminação por mercúrio. As quantidades do metal pesado na água são comparadas com os valores máximos admissíveis pela norma moçambicana, disponível no diploma ministerial n^o 180/2004 de 15 de Setembro do MISAU para as águas destinadas ao consumo humano. A concentração dos metais pesados no ar é comparada com os valores máximos admissíveis pela Organização Mundial da Saúde.

4.2. Níveis de mercúrio na água

Na figura 9, são apresentados na forma de gráfico os resultados da análise de Hg nas amostras de água em bacias, onde as barras a azul designam amostras provenientes do distrito Moatize e a verde designam amostras do distrito de Chiuta. De acordo com a figura 9, os níveis de Hg em Moatize apresentam uma variação da concentração de Hg de $44,97 \pm 10,29$ a $4.170,67 \pm 9,40$ ng/L e em Chiúta de $131,03 \pm 7,33$ a $1.587,20 \pm 11,68$ ng/L. Pode-se verificar através do gráfico que os pontos 10 e 11 apresentam teores de Hg iguais à $4.170,67 \pm 9,40$ e $2.453,00 \pm 8,96$ ng/L, respectivamente, e estes encontram-se acima do nível de Hg aceitável pelo Decreto-Lei nº67/2010 que Regula os Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes, que estabelece concentração máxima de 0,002 mg/L. Os pontos mencionados são provenientes do distrito de Chiúta, Povoado de Machinga. Os pontos de amostragem 1, 2, 3 são provenientes do distrito de Moatize, localidade de Kanchoere e 4, 5, 6, do povoado de Nhantamula que revelam níveis de mercúrio de $131,03 \pm 7,33$ a $1.587,20 \pm 11,68$ ng/L. Os pontos 7, 8, 9 são provenientes do distrito de Chiúta no Povoado de Machinga e 12, 13, 14 do povoado de Cató que revelam níveis de mercúrio de $44,97 \pm 10,29$ a $179,50 \pm 12,70$ ng/L. Os valores revelam níveis de mercúrio baixos, o que provavelmente indica que não houve actividades recentes nesses locais ou que as actividades ocorreram há bastante tanto tempo. Mesmo que a concentração de mercúrio nestes pontos esteja abaixo do limite máximo, ainda é importante se preocupar pois devido à sua alta toxicidade, mesmo em pequenas quantidades a sua capacidade de se acumular, permanecer no corpo humano e a sua resistência à degradação biológica representam um factor de grande risco.

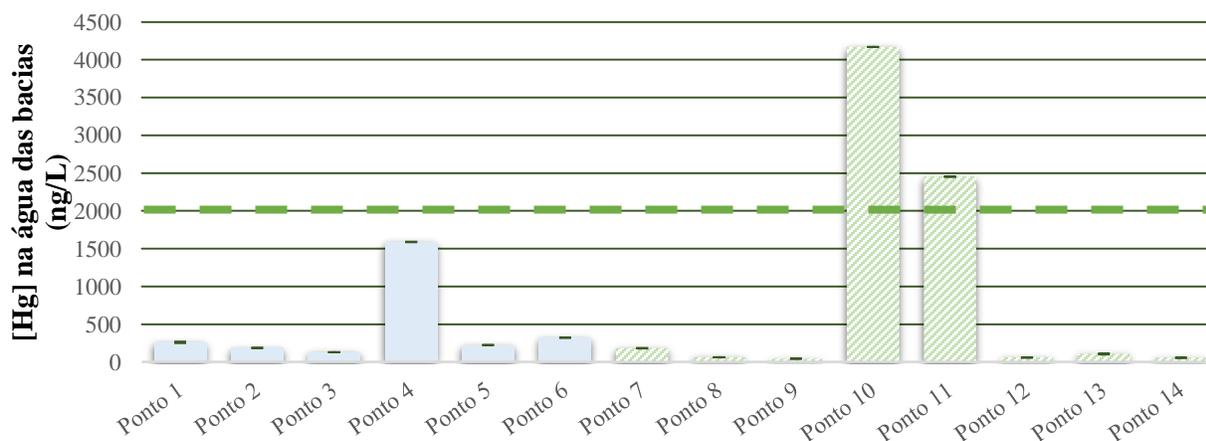


Figura 12: Concentração de Hg em amostras de água em bacias

Na figura 10, são apresentados na forma de gráfico os resultados da análise de Hg nas amostras de água em rios, onde as barras a azul designam amostras provenientes do distrito Moatize e a verde designam amostras do distrito de Chiuta. De acordo com a figura 9, os níveis de Hg nos pontos de amostragem 1, 2, são provenientes do distrito de Moatize, localidade de Kanchoere e 4, 5, 6, do povoado de Nhantamula que apresentam a concentração de Hg variando de $0,17 \pm 0,38$ a $23,97 \pm 3,76$ ng/L e os pontos 7, 8, 9 são provenientes do distrito de Chiúta no Povoado de Machinga e 9, 10 do povoado de Cató revelam níveis de mercúrio $32,50 \pm 8,64$ a $154,57 \pm 7,01$ ng/L, valores abaixo do limite estabelecido pelo diploma ministerial n° 180/2004 de 15 de Setembro que rege os padrões de qualidade de águas destinadas ao consumo humano e permite uma concentração máxima de mercúrio até $0,001\text{mg/L}$ ou 1000ng/L . É relevante não só considerar os padrões de mercúrio para o consumo humano, mas também para a descarga dessas águas nos rios. Além de serem utilizadas pelos seres humanos, encontramos nesses rios seres vivos como as plantas aquáticas, algas, bactérias, fungos e peixes que contribuem para a manutenção do equilíbrio ambiental. Os mesmos seres podem ser consumidos pelos cidadãos locais, resultando na ingestão indirecta de mercúrio. Segundo o INAM (2022), De Novembro a Março é a época de maior precipitação em Tete e de acordo com Sousa (2016) é onde ocorre o maior transporte de material das áreas mais altas para as mais planas, sobretudo de material particulado, funcionando como um importante veículo de transporte de Hg e se atribui a esse processo, erosão, através do escoamento superficial da água das chuvas após lavagem e lixiviação dos solos da região, carregando elementos-traço e o próprio mercúrio para rios, lagos e poços.

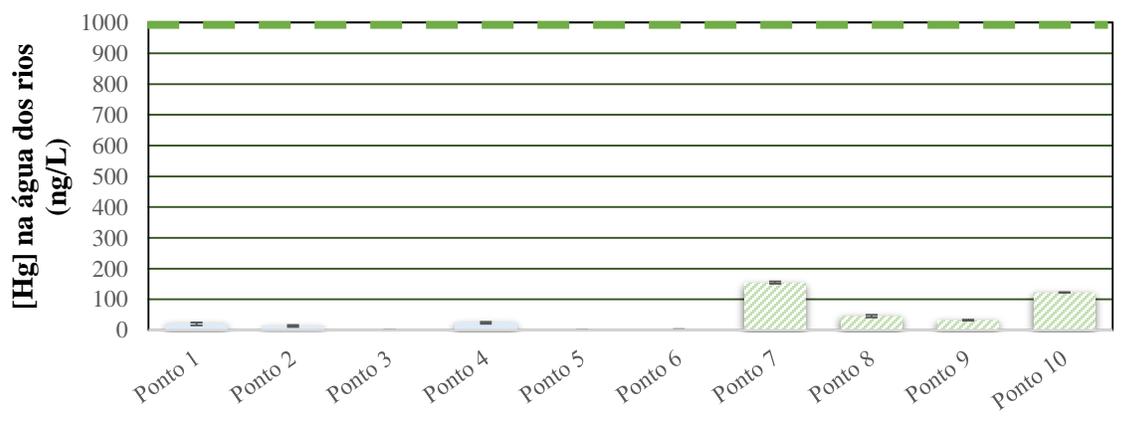


Figura 13: Concentração de Hg em amostras de água em rios

Na figura 11, são apresentados na forma de gráfico os resultados obtidos na análise de Hg nas amostras de água em poços, onde as barras a azul designam amostras provenientes do distrito Moatize e a verde designam amostras do distrito de Chiuta. Os pontos de amostragem revelam baixos níveis de mercúrio na água tanto para os distritos de Moatize como o de Chiúta, que variam de $0,67 \pm 1,43$ a $31,00 \pm 2,48$ ng/L para Moatize e de $2,90 \pm 1,27$ a $51,33 \pm 7,59$ ng/L para Chiúta, valores abaixo do limite estabelecido pelo diploma ministerial nº 180/2004 de 15 de Setembro (1.000 ng/L). apesar de serem valores baixos eles indicam que o mercúrio se dispersou o suficiente ate atingir o lençol freático ou as águas subterrâneas. Ainda é factor preocupação pois, a longo prazo o cenário pode ser outro, e por esse motivo é necessário um monitoramento contínuo.

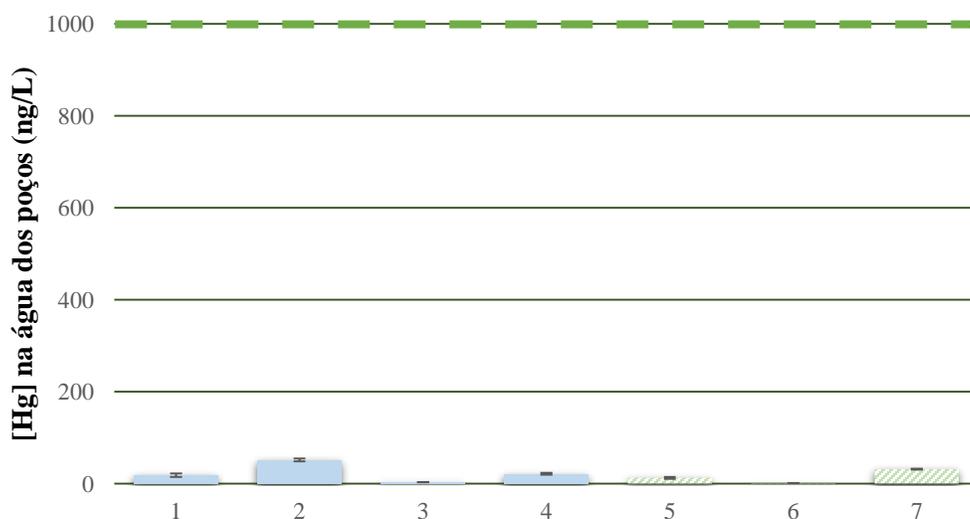


Figura 14: Concentração de Hg em amostras de água em poços

Durante o processo de separação de ouro e do Hg, a recuperação do mercúrio não é eficiente e quantidades deste metal tóxico são perdidas no meio ambiente. Segundo Azaroff (2019) para cada kg de ouro produzido são utilizados 1,5 kg de Hg, dos quais 70% são recuperados e 30% são perdidos para o ambiente. Deste valor perdido, 20% vão para atmosfera, durante a queima da amálgama, e retornam para os rios pela chuva; os outros 10% são despejados directamente nos corpos de água. À medida que o tempo avança, as pequenas contribuições da chuva e do ar atmosférico vão alterando o ambiente. Por isso, é imperativo adoptar medidas de mitigação ou redução das actividades artesanais, procurando alternativas de mineração que não prejudiquem o ambiente e não deixem os residentes locais desempregados, uma vez que para eles, esta é uma fonte de rendimento.

4.3. Comparação com outros estudos

Pode ser feita uma comparação com estudos similares realizados em alguns países africanos e de outros continentes, dos resultados obtidos nos locais de mineração em Tete como mostrado na tabela 4.

Tabela 5: Concentração de Hg em rios internacionais

Referência e locais de estudos	Concentração de Hg (ng/L)
Abraham et al., 2018 - Austrália	62.000
Malehase et al., 2016 - África do Sul	32.000 – 70.000
Appoh et al., 2011 - Gana, rio Tainsu	872 na época chuvosa e 1.343 na época seca
Mambrey et al., 2020 - Zimbabwe	1.663
Idowu et al., 2013 - Nigéria	21.000
Omara et al., 2019 - distrito de ouro de Busia, Uganda	1.250.000
Jone, 2023 – Munhena, Manica	162,11 - 5.963,96

Os resultados deste estudo indicam que a concentração de Hg nos rios analisados é inferior à observada em outros rios localizados na Austrália, África do Sul, Nigéria, Uganda e Zimbabwe, conforme demonstrado na Tabela 4. Este fenómeno deve-se à maior intensidade da atividade mineira nas proximidades desses rios em comparação com os distritos de Chiúta e Moatize, aqui estudados. Malehase et al., (2016) referem que Randfontein, situado a sudoeste de Joanesburgo, na África do Sul, é a maior e mais antiga mina de ouro, utilizando o processo de amálgama para extrair ouro dos minérios, empregando uma quantidade significativamente maior de Hg em comparação com os estudos feitos com Jone (2023) em Munhena. De modo semelhante, as minas de Uganda também apresentam concentrações mais elevadas de Hg em relação a Munhena, devido à intensa atividade mineira e ao maior número de mineiros (Omara et al., 2019). No entanto, a maior parte do Hg utilizado é recuperada, evitando a contaminação dos rios. No Zimbabwe, observa-se uma maior especialização em processos técnicos para o uso correcto do Hg, sendo que métodos alternativos de recuperação de ouro sem Hg, como o uso de bórax, caixas de eclusa e peneiramento direto, são amplamente utilizados na África do Sul.

4.4. Concentração de mercúrio no ar

Moçambique não possui uma legislação para limites de mercúrio em locais de trabalho e, por essa razão, os resultados obtidos foram comparados somente com legislações internacionais. A figura 12 apresenta na forma de gráfico as concentrações de Hg no ar nos diferentes pontos de amostragem no distrito de Moatize e o valor máximo admissível pela WHO. Observando o gráfico e a Tabela C2 é possível verificar que a concentração de Hg varia de 0 a 3.170 ng/m³ onde os pontos de amostragem 2, 3 e 8 não apresentam teores de Hg, sendo assim pode-se chegar à conclusão de que o ar nos locais de amostragem não está contaminado pelo Hg. Os pontos de amostragem mencionados são provenientes do povoado de Nhantamula e Mavunde. Em relação aos pontos de amostragem 1, 4, 5, 6 e 7 os níveis de Hg encontram-se acima do limite de acordo com a WHO que estabelece um valor de 25ng/m³, que indica que estes locais estão poluídos por mercúrio. A concentração de Hg nesses pontos varia de 95 a 3.170 ng/m³. Os pontos de leitura acima mencionados são leituras feitas no povoado de Kanchoere, Nhantamula e Mavunde, onde foi possível verificar que à medida que se foi fazendo a leitura os níveis de mercúrio foram aumentando. Este é um caso de poluição pontual ou localizada em que é possível localizar a fonte da poluição. Segundo Lima (2016) os poluentes pontuais podem ser mais rápidos e facilmente controlados.

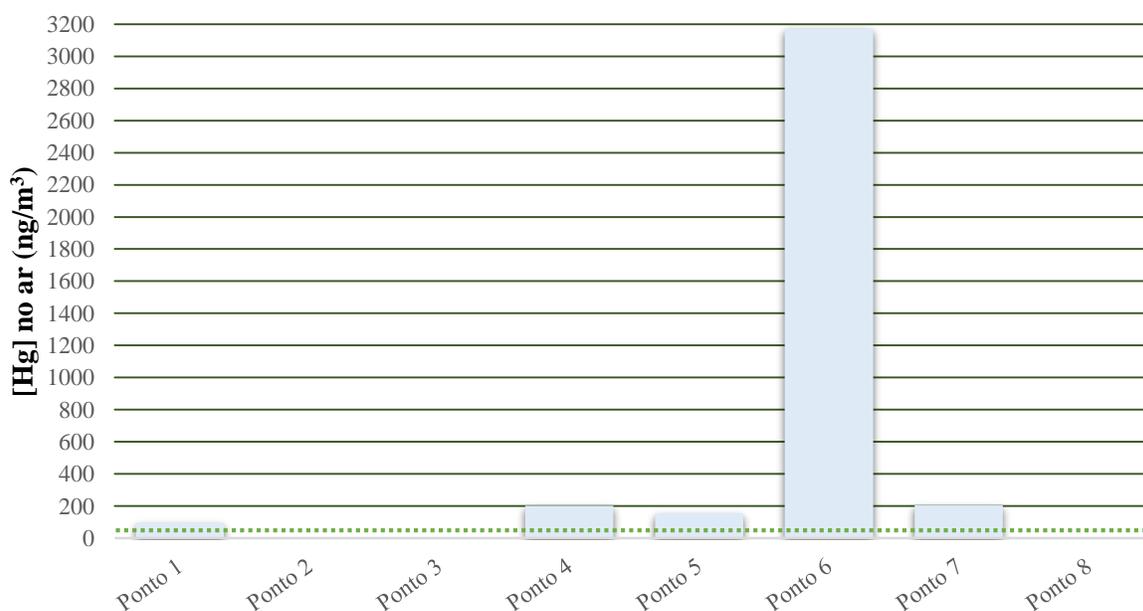


Figura 15: Concentração de mercúrio no ar no distrito de Moatize

5. Conclusões e Recomendações

5.1. Conclusões

Foi possível validar as condições para a determinação do Hg em água. Os resultados experimentais mostraram que o teor de Hg recuperado foi de 97,07 a 102,33%.

Os resultados experimentais revelam que o teor de Hg encontrado em amostras de água das bacias apresentou valores acima de 2000ng/L, valor máximo permitido para o descarte de efluentes contendo mercúrio de acordo com o Decreto-lei nº67/2010. Os níveis de Hg em Moatize apresentam uma variação da concentração de Hg de 44,97±10,29 a 4.170,67±9,40 ng/L e em Chiúta de 131,03±7,33 a 1.587,20±11,6 ng/L. Os pontos de amostragem 10 e 11 apresentaram maiores teores de Hg com 4.170,67±9,40 e 2.453,00±8,96 ng/L, respectivamente, estas amostras são provenientes do distrito de Chiúta no povoado de Cató. E nos restantes pontos somente houve contaminação e os teores de Hg estão relativamente baixos variando de 44,97±10,29 a 1.587,20±11,68 ng/L. As outras amostras, dos rios e dos poços apresentaram concentrações de Hg na água inferiores ao limite máximo estabelecido pelo diploma ministerial nº 180/2004 de 15 de Setembro (1000ng/L). Os teores de Hg variam de 0,17±0,38 a 23,97±3,76 ng/L para o povoado de Nhantamula. E para o povoado de Machinga e povoado de Cató o teor de Hg varia de 32,50±8,64 a 154,57±7,01 ng/L nos rios. Em poços variam de 0,67±1,43 a 31,00±2,48 ng/L para Moatize e de 2,90±1,27 a 51,33±7,59 ng/L para Chiúta.

Quanto às análises de ar, os teores de Hg detectados apresentaram valores acima do recomendado pela WHO (25 ng/m³). Os pontos de amostragem 1, 4, 5, 6, e 7 apresentaram maiores teores de Hg variando de 95 a 3.170 ng/m³, destacando se o ponto 6 do povoado de Kanchoere que apresentou uma concentração de Hg muito elevado, onde possivelmente exista uma contaminação pontual. Os pontos 2, 3 e 8 que representam os povoados de Nhantamula e Mavudze (Ponte-Rio Mavundze) apresentaram as concentrações abaixo do limite estabelecido pela WHO variando de 0 a 5 ng/m³.

Este estudo realça a necessidade premente de abordar a contaminação por mercúrio, através da implementação de medidas de mitigação e sensibilização. Os resultados obtidos neste estudo em amostras de água, comparados com outros locais como Bangladesh, África do Sul, Nigéria, Uganda e Zimbabwe são menores, entretanto a protecção da saúde pública e do meio ambiente requer uma acção imediata para reduzir a exposição ao mercúrio e as suas consequências.

5.2.Recomendações

A partir da análise dos resultados recomenda-se:

- ❖ Determinação da concentração de mercúrio nos diferentes compartimentos onde ele pode ser encontrado, exemplo em peixes, plantas marítimas e sedimentos. Pois o mercúrio tem a capacidade de bioacumulação, biomagnificação e bioconcentração, neste caso, pode existir uma chance de o mercúrio estar localizado em outros lugares;
- ❖ Determinação da concentração de outros metais pesados na água;
- ❖ Expandir a análise para outras áreas geográficas e distritos em Moçambique para obter uma visão abrangente da contaminação por mercúrio em todo o país;
- ❖ Fazer uma avaliação contínua.

6. Referências Bibliográficas

1. Abraham, J., Dowling, K., & Florentine, S. (2018). Assessment of potentially toxic metal contamination in the soils of a legacy mine site in Central Victoria, Australia. *Chemosphere*, 192, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.150>
2. Almeida, M. D. de. (2005). *Biogeoquímica do mercúrio na interface solo - atmosfera na Amazônia*. Tese de Doutorado em Geoquímica Ambiental, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói. 186 pp. <https://app.uff.br/riuff/handle/1/5897>
3. Appoh, R. K., Doamekpor, L. K., Hayford, E. K., Klake, R. K., & Nartey, V. K. (2011). Assessment of Mercury Pollution in Rivers and Streams around Artisanal Gold Mining Areas of the Birim North District of Ghana. *Journal of Environmental Protection*, 02(09), 1227–1239. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.29141>
4. Azaroff, A., Tessier, E., Deborde, J., Guyoneaud, R., & Monperrus, M. (2019). Mercury and methylmercury concentrations, sources and distribution in submarine canyon sediments (Capbreton, SW France): Implications for the net methylmercury production. *Science of The Total Environment*, 673, 511–521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.111>
5. Barbour, R. (2007). *Avaliação crítica de métodos analíticos para determinação de arsênio e mercúrio em amostras de ácido sulfúrico de uma metalurgia de cobre*. Tese de Mestrado em Química Analítica, Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 95 pp. <http://www.repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/10010>
6. Baudouin, C., Charveron, M., Tarroux, R., & Gall, Y. (2002). Environmental pollutants and skin cancer. *Cell Biology and Toxicology*, 18(5), 341–348. <https://doi.org/10.1023/a:1019540316060>
7. Beckers, F., & Rinklebe, J. (2017). Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(9), 693–794. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1326277>
8. Bermeo, A. (2001). Jornada Internacional sobre el impacto ambiental del mercurio utilizado por la minería aurífera artesanal en Iberoamérica. In *Gestión Ambiental en la Minería Artesanal*.l Acedido em 24 de Novembro de 2023 em: <http://www.gama-peru.org/jornada-hg.pdf>
9. Boischio, A. A. P., & Barbosa, A. (1993). Exposição ao mercúrio orgânico em populações ribeirinhas do Alto Madeira, Rondônia, 1991: resultados preliminares. *Cadernos de Saúde Pública*, 9(2), 155–160. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X1993000200006>
10. Brenda, L. S. S. (2013). *Historic Patterns of Deposition and Biomagnification of Mercury in*

Selected Wetland Systems. Tese de Doutorado em Biologia (Trilha Ecológica), Universidade de Toledo, Toledo, 159 pp. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=toledo1372863246

11. Chen, F., Vallyathan, V., Castranova, V., & Shi, X. (2001). Cell apoptosis induced by carcinogenic metals. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 222(1–2), 183–188. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11678600>
12. Decreto-lei nº180/2004 de 15 de Setembro - Regulamento sobre a Qualidade da Água para o Consumo Humano. Imprensa pública de Moçambique. Maputo
13. Decreto-lei nº67/2010 - Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e Emissão de Efluentes
14. Drude de Lacerda, L. (2005). *BIOGEOQUÍMICA DO MERCÚRIO NA INTERFACE SOLO-ATMOSFERA NA AMAZÔNIA*. <https://app.uff.br/riuff/handle/1/5897>
15. EPA. (1974). *METHOD 245.2. Mercury (Automated Cold Vapor Technique)* (Issue 3). http://www.cromlab.es/Articulos/Metodos/EPA/200/245_2.pdf
16. Fagerström, T., & Jernelöv, A. (1972). Some aspects of the quantitative ecology of mercury. *Water Research*, 6(10), 1193–1202. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(72\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(72)90019-X)
17. Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4ª edição, Prentice Hall. United States of America.
18. Gustin, M. S., Bank, M. S., Bishop, K., Bowman, K., Branfireun, B., Chételat, J., Eckley, C. S., Hammerschmidt, C. R., Lamborg, C., Lyman, S., Martínez-Cortizas, A., Sommar, J., Tsui, M. T.-K., & Zhang, T. (2020). Mercury biogeochemical cycling: A synthesis of recent scientific advances. *The Science of the Total Environment*, 737, 139619. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139619>
19. Idowu, O. S., Muruf, A. K., Osaguona, P., & Ajayi, J. (2013). Mercury contamination in artisanal gold mining area of Manyera river, niger state Nigeria. *E3 Journal of Environmental Research and Management*, 4(9), 326–0333. <http://www.e3journals.org>
20. INAM. (2022). *Monitoria Climática da Província de TETE*. https://www.inam.gov.mz/images/BCP2022/Tete/BCP-Agosto-2022_TETE.pdf
21. Janicki, K., Dobrowolski, J., & Kraśnicki, K. (1987). Correlation between contamination of the rural environment with mercury and occurrence of leukaemia in men and cattle. *Chemosphere*, 16(1), 253–257. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(87\)90129-9](https://doi.org/10.1016/0045-6535(87)90129-9)
22. Jone, D. C. (2023). *Avaliação da contaminação por mercúrio na água e sedimentos na area de mineração artesanal de ouro no centro de processamento Munhena, Manica*. Tese de Licenciatura

em Química Industrial, Departamento de Química, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo. 70 pp.

23. Kasper, D., Forsberg, B. R., Almeida, R. de, Bastos, W. R., & Malm, O. (2015). METHODOLOGIES FOR SAMPLING, PRESERVATION AND STORAGE OF WATER SAMPLES FOR MERCURY ANALYSIS - A REVIEW. *Química Nova*, 38(3), 410–418. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150020>
24. Lemos, A. dos S. (2023). MERCURY AND THE POLLUTION OF THE RIVERS IN THE YANOMAMIS LANDS. *International Journal of Biological and Natural Sciences*, 3(2), 1–8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.813322308029>
25. Lima, R. N. de S., Ribeiro, C. B. de M., Barbosa, C. C. F., & Rotunno Filho, O. C. (2016). Estudo da poluição pontual e difusa na bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica de Funil utilizando modelagem espacialmente distribuída em Sistema de Informação Geográfica. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(1), 139–150. <https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100127676>
26. Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes*. 3ª edição, Springer Berlin Heidelberg. Australia. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
27. LUMEX. (2015a). *RA-915M mercury analyzer*. <http://lumexinstruments.com>
28. LUMEX. (2015b). *RA-915M MERCURY ANALYZER OPERATION MANUAL*. <http://lumexinstruments.ca>
29. LUMEX. (2015c). *RP-92 Attachment*. www.Lumexinstruments.com
30. Malehase, T., Daso, A. P., & Okonkwo, J. O. (2016). Determination of mercury and its fractionation products in samples from legacy use of mercury amalgam in gold processing in Randfontein, South Africa. *Emerging Contaminants*, 2(3), 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2016.07.003>
31. Mambrey, V., Rakete, S., Tobollik, M., Shoko, D., Moyo, D., Schutzmeier, P., Steckling-Muschack, N., Muteti-Fana, S., & Bose-O'Reilly, S. (2020). Artisanal and small-scale gold mining: A cross-sectional assessment of occupational mercury exposure and exposure risk factors in Kadoma and Shurugwi, Zimbabwe. *Environmental Research*, 184(November 2019), 109379. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109379>
32. Mapurango, J. M. F. (2014). *O Papel dos Governos Distritais na Gestão Sustentável da Mineração Artesanal de Ouro em Moçambique: O Caso do Distrito de Manica 2008-2013*. Tese de

Licenciatura em Ciência Política, Faculdade de Letras e Ciências Sociais, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo. 84 pp.

33. Micaroni, R. C. da C. M., Bueno, M. I. M. S., & Jardim, W. de F. (2000). Compostos de mercúrio. Revisão de métodos de determinação, tratamento e descarte. *Química Nova*, 23(4), 487–495. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422000000400011>
34. Ministério da Administração Estatal. (2014a). *PERFIL DO DISTRITO DE CHIUTA PROVÍNCIA DE TETE* (Primeira). MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL. <http://www.portaldogoverno.gov.mz>
35. Ministério da Administração Estatal. (2014b). *PERFIL DO DISTRITO DE MOATIZE PROVÍNCIA DE TETE* (Primeira). MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL. <http://www.portaldogoverno.gov.mz>
36. MIREME. (2017). *Perguntas & Respostas: sobre recusos minerais*. http://www.mireme.gov.mz/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=153
37. Omara, T., Karungi, S., Kalukusu, R., Nakabuye, B., Kagoya, S., & Musau, B. (2019). Mercuric pollution of surface water, superficial sediments, Nile tilapia (*Oreochromis nilotica* Linnaeus 1758 [Cichlidae]) and yams (*Dioscorea alata*) in auriferous areas of Namukombe stream, Syanyonja, Busia, Uganda. *PeerJ*, 7, e7919. <https://doi.org/10.7717/peerj.7919>
38. Pavlogeorgatos, G., & Kikilias, V. (2013). The importance of mercury determination and speciation to the health of the general population. *Global NEST Journal*, 4(2), 107–125. <https://doi.org/10.30955/gnj.000242>
39. Ratnaike, R. N. (2003). Acute and chronic arsenic toxicity. *Postgraduate Medical Journal*, 79(933), 391–396. <https://doi.org/10.1136/pmj.79.933.391>
40. Santos, G. A. (2013). *Myths and realities in artisanal gold mining mercury contamination*. Tese de Mestrado em Engenharia de Minas, Faculdade de estudos de Pos-Graduação, Universidade da Colômbia Britânica, Colômbia. 180 pp. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.14288/1.0071961>
41. Scarpelli, W. (2003). *INTRODUÇÃO À GEOLOGIA MÉDICA*. https://www.pick-upau.org.br/mundo/lobo_homem_mercurio/cprm_gov_br_geologia_medica.pdf
42. Senderowitz, S., Polivanov, H., & Ricardo Gonçalves Cesar, Ds. (2011). *Determinação dos teores de mercúrio em solos, sedimentos e águas fluviais em área de mineração de ouro: estudo de caso do município de Paracatu (MG)*. Tese de curso de Geologia, departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 51 pp.

<http://hdl.handle.net/11422/5385>

43. Sholupov, S., Pogarev, S., Ryzhov, V., Mashyanov, N., & Stroganov, A. (2004). Zeeman atomic absorption spectrometer RA-915+ for direct determination of mercury in air and complex matrix samples. *Fuel Processing Technology*, 85(6–7), 473–485. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.003>
44. Sousa, E. da S. (2016). *Avaliação da contaminação por mercúrio na foz do rio tapajós e exposição ambiental à população de santarém-pa, brasil*. Tese de Doutorado em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade federal do Pará, Belém. 181 pp. https://repositorio.museu-goeldi.br/bitstream/mgoeldi/1964/1/tese_enilson_da_silva_sousa_2016.pdf
45. TORRES, D. P. (2009). *Desenvolvimento de métodos simples e rápidos para determinação de mercúrio total e inorgânico em amostras biológicas por espectrometria de absorção atômica com vapor frio*. Tese de Mestrado em Química Analítica, Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 63 pp. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/92519>
46. Trivelato, G. da C. (2011). *Efeitos do mercúrio à saúde e no ambiente*.
47. Vareda, J. P., Valente, A. J. M., & Durães, L. (2019). Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of Environmental Management*, 246, 101–118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.126>
48. WHO. (2021). *EXPOSURE TO MERCURY: A MAJOR PUBLIC HEALTH CONCERN* (W. H. Organization (ed.); Second edi). Chemical Safety and Health Unit (CHE). <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/340715/9789240023567-eng.pdf?sequence=1>
49. Windmüller, C. C., Santos, R. C., Athayde, M., & Palmieri, H. E. L. (2007). Distribuição e especiação de mercúrio em sedimentos de áreas de garimpo de ouro do quadrilátero ferrífero (MG). *Química Nova*, 30(5), 1088–1094. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500007>
50. Zavariz, C., & Glina, D. M. R. (1992). Avaliação clínico-neuro-psicológica de trabalhadores expostos a mercúrio metálico em indústria de lâmpadas elétricas. *Revista de Saúde Pública*, 26(5), 356–365. <https://doi.org/10.1590/S0034-89101992000500010>

Anexos

Anexo A: Preparação dos reagentes e soluções usadas.

❖ Preparação da solução de cloridrato de hidroxilamina (NH₂OH.HCl)

Pesou-se cerca de 2,5 g de NH₂OH. HCl e colocou-se em um balão de 25 mL, dissolveu-se em 10 – 15 mL de água destilada de seguida levou-se a solução até à marca, isto é, perfazer com água destilada. Esta solução é usada somente quando é recém-preparada.

❖ Solução de hidróxido de sódio (NaOH, 30 %)

Colocou-se 70 mL de água destilada em um béquer de vidro resistente ao calor e cuidadosamente com agitação, colocou-se cerca de 30 g de hidróxido de sódio. Após a dissolução e resfriamento transferiu-se a solução para um recipiente de polietileno.

❖ Preparação da solução de dicloreto de estanho dihidratado (SnCl₂. 2H₂O 100 g/L).

Colocou-se 50 mL de água destilada em um erlenmeyer de 250 mL, e cuidadosamente adicionou-se 15 mL de ácido sulfúrico, por fim adicionou-se 10 g de cloreto de estanho (II) aqueceu-se cuidadosamente o erlenmeyer evitando-se ferver até que todo o precipitado possa se dissolver. Após o arrefecimento diluiu-se a solução com água destilada até 100 mL.

❖ Solução de permanganato de potássio (KMnO₄, 50 g/L)

Colocou-se cerca de 5 g de permanganato de potássio num balão volumétrico de 100 mL e dissolveu-se em 20 – 30 mL de água destilada. De seguida per fez-se até à marca do balão.

❖ Solução de peroxodissulfato de potássio (K₂S₂O₈, 50 g/L)

Colocou-se cerca de 1,25 g de peroxodissulfato de potássio em um balão de 25 mL e dissolveu-se em 10 – 15 mL de água destilada, em seguida per fez-se com água destilada. Usa-se apenas a solução recém-preparada.

❖ **Procedimentos de preparação dos padrões**

Solução stock de mercúrio 10 ppb

Adicionou-se cerca de 30 mL água destilada para um balão de 50 mL, e de seguida 5 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 100ppb. Por fim completou-se o volume do balão com a água destilada.

1. Solução stock de mercúrio 1000 ppt

Adicionou-se cerca de 30 mL água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 1 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 100 ppb. Por fim completou-se o volume do balão com água destilada.

2. Solução stock de mercúrio 500 ppt

Adicionou-se cerca de 30 mL de água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 5 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 10 ppb. Por fim completou-se o volume do balão com água destilada.

3. Solução stock de mercúrio 100ppt

Adicionou-se cerca de 30 mL de água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 1 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 10 ppb. Por fim completou-se o volume do balão com a água destilada.

4. Solução stock de mercúrio 10ppt

Adicionou-se cerca de 30 mL de água destilada para um balão de 100 mL, e de seguida 1 mL da solução da solução stock de mercúrio C(Hg) 1000 ppt. Por fim completou-se o volume do balão com a água destilada.

Anexo B: Resultados das análises obtidas nas amostras de água das bacias do distrito Moatize (B1) e Chiúta (B2)

Tabela B1

<i>Amostra</i>	<i>[Hg]=ng/L</i>			<i>Media</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>LC</i>	<i>Alpha</i>
	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>				
1	222,70	224,30	229,40	225,47	3,50	8,69	0,05
2	329,20	320,30	310,50	320,00	9,35	23,24	0,05
3	134,40	129,80	128,90	131,03	2,95	7,33	0,05
4	1.585,00	1.584,00	1.592,60	1.587,20	4,70	11,68	0,05
5	181,90	189,10	188,80	186,60	4,07	10,12	0,05
6	262,60	250,40	270,90	261,30	10,31	25,62	0,05

Tabela B2

<i>Amostra</i>	<i>[Hg]=ng/L</i>			<i>Media</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>LC</i>	<i>Alpha</i>
	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>				
7	188,50	179,80	179,50	182,60	5,11	12,70	0,05
8	60,00	65,90	64,50	63,47	3,08	7,66	0,05
9	40,20	47,70	47,00	44,97	4,14	10,29	0,05
10	4.168,00	4.175,00	4.169,00	4.170,67	3,79	9,40	0,05
11	2.452,00	2.457,00	2.450,00	2.453,00	3,61	8,96	0,05
12	55,50	54,40	54,30	54,73	0,67	1,65	0,05
13	105,30	109,50	103,50	106,10	3,08	7,65	0,05
14	55,60	55,50	60,70	57,27	2,97	7,39	0,05

Anexo C: Resultados das análises obtidas nas amostras de água dos rios do distrito Moatize (C1) e Chiúta(C2)

Tabela C1

<i>Amostra</i>	<i>[Hg]=ng/L</i>			<i>Media</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>LC</i>	<i>Alpha</i>
	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>				
<i>1</i>	<i>21,00</i>	<i>25,00</i>	<i>15,00</i>	<i>20,33</i>	<i>5,03</i>	<i>12,50</i>	<i>0,05</i>
<i>2</i>	<i>15,00</i>	<i>15,30</i>	<i>10,00</i>	<i>13,43</i>	<i>2,98</i>	<i>7,40</i>	<i>0,05</i>
<i>3</i>	<i>0,00</i>	<i>1,00</i>	<i>0,50</i>	<i>0,50</i>	<i>0,50</i>	<i>1,24</i>	<i>0,05</i>
<i>4</i>	<i>25,70</i>	<i>23,30</i>	<i>22,90</i>	<i>23,97</i>	<i>1,51</i>	<i>3,76</i>	<i>0,05</i>
<i>5</i>	<i>0,00</i>	<i>0,20</i>	<i>0,30</i>	<i>0,17</i>	<i>0,15</i>	<i>0,38</i>	<i>0,05</i>
<i>6</i>	<i>0,20</i>	<i>1,00</i>	<i>0,90</i>	<i>0,70</i>	<i>0,44</i>	<i>1,08</i>	<i>0,05</i>

Tabela C2

<i>Amostra</i>	<i>[Hg]=ng/L</i>			<i>Media</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>LC</i>	<i>Alpha</i>
	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>				
<i>7</i>	<i>157,80</i>	<i>152,60</i>	<i>153,30</i>	<i>154,57</i>	<i>2,82</i>	<i>7,01</i>	<i>0,05</i>
<i>8</i>	<i>45,90</i>	<i>48,30</i>	<i>42,50</i>	<i>45,57</i>	<i>2,91</i>	<i>7,24</i>	<i>0,05</i>
<i>9</i>	<i>36,50</i>	<i>30,20</i>	<i>30,80</i>	<i>32,50</i>	<i>3,48</i>	<i>8,64</i>	<i>0,05</i>
<i>10</i>	<i>127,50</i>	<i>118,50</i>	<i>121,20</i>	<i>122,40</i>	<i>4,62</i>	<i>11,47</i>	<i>0,05</i>

Anexo D: Resultados das análises obtidas nas amostras de água dos poços do distrito Moatize (D1) e Chiúta(D2)

Tabela D1

<i>Amostra</i>	<i>[Hg]=ng/L</i>			<i>Media</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>LC</i>	<i>Alpha</i>
	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>				
<i>1</i>	<i>15,00</i>	<i>22,00</i>	<i>17,00</i>	<i>18,00</i>	<i>3,61</i>	<i>8,96</i>	<i>0,05</i>
<i>2</i>	<i>52,00</i>	<i>48,00</i>	<i>54,00</i>	<i>51,33</i>	<i>3,06</i>	<i>7,59</i>	<i>0,05</i>
<i>3</i>	<i>3,00</i>	<i>2,5</i>	<i>2,80</i>	<i>2,90</i>	<i>0,14</i>	<i>1,27</i>	<i>0,05</i>
<i>4</i>	<i>23,00</i>	<i>21,00</i>	<i>19,00</i>	<i>21,00</i>	<i>2,00</i>	<i>4,97</i>	<i>0,05</i>
<i>4</i>	<i>13,00</i>	<i>10,00</i>	<i>14,00</i>	<i>12,33</i>	<i>2,08</i>	<i>5,17</i>	<i>0,05</i>

Tabela D2

<i>Amostr a</i>	<i>[Hg]=ng/L</i>			<i>Media</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>LC</i>	<i>Alpha</i>
	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>				
<i>5</i>	<i>1,00</i>	<i>0,00</i>	<i>1,00</i>	<i>0,67</i>	<i>0,58</i>	<i>1,43</i>	<i>0,05</i>
<i>6</i>	<i>32,00</i>	<i>30,00</i>	<i>31,00</i>	<i>31,00</i>	<i>1,00</i>	<i>2,48</i>	<i>0,05</i>

Anexo E: Resultados das análises do ar

Tabela E1: Povoado de Nhantamula (01/11/2022)

#	Hg	Latitude	Longitude	Altitude	Observação
1	95 ng/m ³	15° 56' 54.0"	33° 55' 00.2"	395	Medição de nível de mercúrio no local de processamento. Local aberto permitindo a livre circulação de ar.
2	0 ng/m ³	15° 56' 53.5"	33° 55' 01.9"	391	Medição de nível de mercúrio no riacho
3	0 ng/m ³	15° 56' 56.9"	33° 55' 02.0"	388	Medição de nível de mercúrio no poço, local onde tiram água para consumo
4	203 ng/m ³	15° 56' 53.8"	33° 54' 56.9"	403	Medição de nível de mercúrio no local de processamento (moageira)

Tabela E2: Povoado de Kanchoere (01/11/2022)

#	Hg [ng/m ³]	Latitude	Longitude	Altitude	Observação
1	154 ng/m ³	16° 03' 33.9"	33° 50' 43.9"	346	Medição de mercúrio no local de processamento (moageira), uso do processo de cianetação.
2	3.170 ng/m ³	16° 03' 39.3"	33° 50' 42.6"	332	Medição de mercúrio no local de processamento (moageira).
3	205 ng/m ³	16° 03' 36.8"	33° 50' 42.4"	343	Medição de mercúrio no local de processamento (moageira).

Tabela E3: Mavudze Ponte - Rio Mavudze

#	Hg [ng/m ³]	Latitude	Longitude	Altitude	Observação
1	>5 ng/m ³	15° 48' 23.8"	33° 27' 52.0"	207	ajusante do rio Mavudze.
2	0 ng/m ³	15° 48' 10.6"	33° 28' 32.0"	214	amontante do rio Mavudze.

Anexo F: Fórmulas para cálculo de médias experimentais das análises brutas e da concentração de Hg na amostra, desvio padrão, desvio padrão relativo e intervalo de confiança.

Fórmula F1: Cálculo da média experimental das análises (\bar{X})

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}$$

onde, x_i é o valor de um ataque independente e n , o número total de amostras.

Fórmula F2: Cálculo do desvio padrão (s)

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

onde, n é o número de ataques independentes.

Fórmula F3: Cálculo do desvio padrão relativo (%RSD)

$$\%RSD = 100 \frac{s}{\bar{X}}$$

Fórmula F4: Cálculo de intervalo de confiança (IC)

$$IC = \bar{X} \pm \frac{t \times s}{\sqrt{N}}$$

Fórmula F5: Cálculo das médias das concentrações finais das amostras de água obtidas pela diferença entre concentrações brutas e o branco multiplicada pelo factor diluição (F_d).

$$X = (C_{\text{amostras}} - C_{\text{brancos}}) \times F_d$$

$$F_d = \frac{V_{\text{final}}}{V_{\text{inicial}}} = \frac{50 \text{ mL}}{35 \text{ mL}} = 1.43$$

onde: N - número de réplicas (3); t_{crit} - student tabelado (4,30); X - concentração de Hg na amostra; C_{amostras} concentrações brutas (análise 1, 2 e 3) obtidas; C_{brancos} médias dos brancos e F_d factor de diluição. No cálculo das concentrações finais nas amostras foi feita a subtração com a média do branco e multiplicado pelo factor de diluição individualmente e no final achada a média

e o desvio padrão para assim as concentrações serem apresentadas pelo intervalo de confiança (IC) com um nível de confiança de 95 %.