

**FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA  
NÚCLEO DE PESQUISA PARA A PEQUENA MINERAÇÃO RESPONSÁVEL**

**CARLOS HENRIQUE XAVIER ARAUJO  
MARCELLO MARIZ VEIGA  
GIORGIO DE TOMI**

**PANORAMA NACIONAL DA  
MINERAÇÃO ARTESANAL E EM PEQUENA ESCALA  
DE OURO**

**VOLUME VIII  
INVENTÁRIO DAS EMISSÕES E LIBERAÇÕES DE MERCÚRIO**

**SÃO PAULO  
ABRIL/2025**



CARLOS HENRIQUE XAVIER ARAUJO  
MARCELLO MARIZ VEIGA  
GIORGIO DE TOMI

**PANORAMA NACIONAL DA  
MINERAÇÃO ARTESANAL E EM PEQUENA ESCALA  
DE OURO**

**VOLUME VIII**  
INVENTÁRIO DAS EMISSÕES E LIBERAÇÕES DE MERCÚRIO

Estudo realizado no âmbito do Projeto “Desenvolvimento do Plano de Ação Nacional para a Mineração Artesanal e em Pequena Escala de Ouro no Brasil”, financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), implementado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e em apoio ao Ministério de Minas e Energia da República Federativa do Brasil.

GEFID 10860 - S1-32GFL-000749  
Ctt. 2137 / 4295

SÃO PAULO  
ABRIL/2025



Projeto Desenvolvimento do Plano de Ação Nacional para a  
Mineração Artesanal e em Pequena Escala de Ouro no Brasil

**Coordenações do Projeto**

Hassan Sohn

**Articulação Institucional**

Giorgio Francesco Cesare de Tomi

**Técnica**

Oswaldo Menta Simonsen Nico

**Financeira**

Carlos Henrique Xavier Araujo

**Atividades de Campo**

Ébida Rosa Santos

**Comunicação**

Dione Macedo

**Organização e Sistematização**

**Equipe de Campo**

Carlos Henrique Xavier Araujo

Deborah Goldemberg

Januaria Pereira Mello

Carlos Eduardo Porto Andrade

Rodrigo Daniel de Miranda Matos

**Geoprocessamento**

João Vitor Santos

**Apoio Operacional**

Elisangela Romanelli Terenci

As opiniões, conclusões, recomendações ou quaisquer afirmações emitidas neste trabalho são de exclusiva e inteira responsabilidade do(s) consultor(es) responsáveis pela sua elaboração, não exprimindo necessariamente a opinião da Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE), ou do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), ou do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) ou do Ministério de Minas e Energia da República Federativa do Brasil.

Todos os dados e conteúdo escrito do presente relatório estão protegidos pela Licença *Creative Commons* Atribuição Não Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0). Os leitores são livres para compartilhar e adaptar o material, mas devem fazer as devidas citações, fornecer um link para o material original e indicar se foram feitas alterações. O material publicado não pode ser utilizado para fins comerciais, nem de forma discriminatória, degradante ou distorcida.

Foto de capa: Carlos Henrique Xavier Araujo  
Localidade: Garimpo de baixão, Pará (2019).



## AGRADECIMENTOS

Os Autores expressam o seu agradecimento às seguintes instituições, pela contribuição para a realização deste trabalho:

Federação das Cooperativas de Mineração do Estado de Mato Grosso - FECOMIM

Federação das Cooperativas de Garimpeiros do Pará - FECOGAP

Organização das Cooperativas Brasileiras - OCB

Agência Nacional de Mineração - ANM

Departamento de Desenvolvimento Sustentável na Mineração do Ministério de Minas e Energia (MME/SGM/DDSM)

Global Mercury Partnership (UNEP/GMP)

Equipe do Projeto Ochroma

Os Autores igualmente expressam seus agradecimentos à equipe de campo e a todas as pessoas envolvidas para realização das atividades de campo, lideranças e corpo técnico de cooperativas e associações de garimpeiros, autoridades e agentes públicos que gentilmente contribuíram para o êxito do trabalho.

Registra-se também o agradecimento ao Emiliano Mendonça Silva pela contribuição nos cálculos estatísticos apresentados neste relatório.



## RESUMO

Este documento apresenta o inventário de emissões e liberações de mercúrio da mineração artesanal e em pequena escala de ouro (MAPE) no Brasil a partir dos dados coletados em campo. Foram considerados 32 balanços metalúrgicos de mercúrio realizados em operações da MAPE de ouro nos estados do Amapá, Amazonas, Mato Grosso e Pará. Do total, 25 balanços foram realizados em contextos com uso de retortas na queima do amálgama e 7 balanços foram conduzidos em operações sem o uso de retortas. Em todos os casos, o material processado era explorado de depósitos secundários, com a amalgamação de concentrados. Com base na média de média nacional 2020 a 2022, as perdas combinadas de mercúrio foram estimadas entre 11,4 t/a e 12,17 t/a. nos cenários mais provável e máximo para o país, respectivamente. Considerando a média de produção dos anos de 2020-2022, o fator ponderado obtido pelo Toolkit (Hgperdido:Auproduzido) foi de 0,401 para a hipótese mais provável. O inventário também aponta estimativas ajustadas para o cenário de clandestinidade da produção aurífera e considera a distribuição das perdas por meio receptor (ar, solo e água), sendo que no cenário provável (C=25%), as emissões atmosféricas totalizaram aproximadamente 5.371 t por ano, enquanto as liberações para o solo e água foram estimadas em 6.065 t/ano, totalizando 11,4 t/ano.

Palavras-chave: garimpo de ouro; mercúrio; contaminação; balanço metalúrgico; emissões e liberações.

ARAUJO, C. H. X., VEIGA, M. M.; DE TOMI, G. **Panorama nacional da mineração artesanal e em pequena escala de ouro, vol. VIII: inventário das emissões e liberações de mercúrio**. São Paulo: FDTE, abr. 2025.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
DDSM	Departamento de Desenvolvimento Sustentável na Mineração
DTVIM	Distribuidora de Títulos e Valores Mobiliários
FDTE	Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia
FECOGAP	Federação das Cooperativas de Garimpeiros do Pará
FECOMIM	Federação das Cooperativas de Mineração do Estado de Mato Grosso
GEF	Fundo Global para o Meio Ambiente
GMP	Global Mercury Partnership
Hg	Mercúrio
MAPE	Mineração Artesanal e em Pequena Escala
METAMAT	Companhia Matogrossense de Mineração
MME	Ministério de Minas e Energia
OCB	Organização das Cooperativas Brasileiras
PAN	Plano de Ação Nacional
PCOs	Postos de Compra de Ouro
PLG	Permissão de Lavra Garimpeira
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral
SIGMINE	Sistema de Informações Geográficas da Mineração
UNEP	United Nations Environment Programme
WOA	Whole Ore Amalgamation



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Etapas de pesagens no balanço metalúrgico do mercúrio .....	5
Tabela 2. Total de balanços de massa realizados em campo .....	9
Tabela 3. Métodos de amalgamação utilizados para extração de ouro .....	14
Tabela 4. Perdas de mercúrio nas localidades do Global Mercury Project .....	19
Tabela 5. Método de amalgamação define as perdas de mercúrio .....	22
Tabela 6. Produção de ouro no Brasil no período de 2018 - 2023 .....	25
Tabela 7. Distribuição dos balanços de mercúrio para o inventário .....	28
Tabela 8. Recuperação de mercúrio e a razão $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$ .....	29
Tabela 9. Principais parâmetros obtidos as operações com retortas .....	32
Tabela 10. Principais parâmetros obtidos as operações retortas .....	35
Tabela 11. Fatores-padrão de entrada de mercúrio do Toolkit PNUMA .....	37
Tabela 12. Fatores-padrão de distribuição de mercúrio do Toolkit PNUMA .....	38
Tabela 13. Fatores-padrão de entrada de mercúrio obtidos no projeto .....	39
Tabela 14. Fatores-padrão de distribuição de mercúrio obtidos no projeto .....	40
Tabela 15. Estimativa de perda total de mercúrio .....	42
Tabela 16. Estimativas de distribuição das perdas por meio receptor .....	45
Tabela 17. Estimativa de perda total de mercúrio (t/a) em diferentes cenários .....	46



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Método de quantificação de mercúrio perdido e recuperado.....	6
Figura 2. Distribuição dos métodos de extração de garimpo de ouro .....	12
Figura 3. Métodos de amalgamação utilizados para extração de ouro .....	15
Figura 4. Quantidade de mercúrio usado na MAPE de ouro .....	20
Figura 5. Preços mínimos e máximos na compra do mercúrio (R\$/Kg) .....	26





## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. METODOLOGIA PARA O BALANÇO DE MERCÚRIO no projeto .....	4
3.1. Medição do Uso de Mercúrio nas Operações Visitadas .....	4
3.2. Locais da Coleta de Dados.....	6
3.3. Critérios de Validação dos Dados Coletados em Campo .....	9
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
4.1. Descrição dos Processos Produtivos da MAPE de Ouro.....	12
4.2. Emissões de Mercúrio no Processo de Amalgamação de Ouro.....	13
4.3. Razão Mercúrio Perdido e Ouro Produzido .....	17
4.4. Perdas do Mercúrio na Amalgamação.....	23
5. BASE DE DADOS OBTIDOS NO PROJETO OURO SEM MERCÚRIO .....	23
5.1. Produção de Ouro no Brasil.....	25
5.2. Oferta de Mercúrio .....	26
5.3. Dados de População Garimpeira e Grau de Informalidade .....	27
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
6.1. Análise dos Balanços Metalúrgicos de Mercúrio .....	28
6.2. Avaliação das Emissões e Liberações de Mercúrio na Queima dos Amalgamas Com o Uso de Retortas .....	31
6.3. Avaliação das Emissões e Liberações de Mercúrio na Queima dos Amalgamas Sem Retortas.....	34
6.4. Estimativas dos Fatores-Padrão de Emissão e Liberação.....	36
6.5. Estimativas das Emissões e Liberações de Mercúrio .....	40
6.5.1. Estimativa de perda total de mercúrio .....	41
6.5.2. Distribuição das emissões e liberações de mercúrio por meio receptor...44	
6.6. Cálculo do Mercúrio Perdido Pelos Dados de Campo .....	46
7. CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
APÊNDICE A. Balanço Metalúrgico Com Uso de Retortas .....	53
APÊNDICE B. Balanço Metalúrgico Sem Uso de Retortas .....	54
APÊNDICE C. Tabela Excel do Toolkit Inventário Nível 2 do PNUMA.....	55

## 1. INTRODUÇÃO

O presente volume faz parte da consolidação do conhecimento atual sobre a MAPE de ouro no Brasil, no âmbito do desenvolvimento do projeto para elaboração do Plano de Ação Nacional (PAN) para a Mineração Artesanal e em Pequena Escala de ouro do Brasil, ou “Projeto Ouro sem Mercúrio”, por meio do inventário das emissões e liberações de mercúrio, para orientar o país com relação a suas obrigações no âmbito da Convenção de Minamata.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) desenvolveu um guia e um kit<sup>1</sup> de ferramentas para estimar o uso de mercúrio (Hg) e documentar as práticas da MAPE de ouro. Esse material é denominado “Toolkit de identificação e quantificação das liberações de mercúrio”, disponibilizado para acesso em abril de 2015. A metodologia do Toolkit baseia-se em balanços de massa para cada subcategoria das fontes de liberação de mercúrio. O Kit de Ferramentas propõe dois níveis de desenvolvimento de inventário: Inventário Nível 1 e Inventário Nível 2. Para o Projeto Ouro sem Mercúrio, foi adotado o Inventário Nível 2 do Toolkit, que permite o ajuste de fatores de emissão e liberação conforme as especificidades locais.

Em 2018, o Projeto “Avaliação Inicial de Minamata”, desenvolvido pelo PNUMA e Ministério do Meio Ambiente com apoio do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), com o objetivo de identificar os impactos e necessidades para a implementação da Convenção de Minamata no Brasil, produziu o “Inventário nacional de emissões e liberações de mercúrio no âmbito da mineração artesanal e de pequena escala no Brasil”. Neste trabalho, foram realizadas medições de emissões e liberações de mercúrio em 14 garimpos.

As medições, realizadas em 2016, indicaram que a emissão de mercúrio para a atmosfera pela MAPE de ouro no Brasil variou entre 11 toneladas a 161 toneladas, dependendo da produção legal e ilegal de ouro, dos diferentes processos utilizados e dos percentuais de uso de controles de emissão. Apesar da variação entre os resultados, as autoras concluíram que a razão média  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  de 1,3 é mais representativo para as operações da MAPE de ouro no Brasil que amalgamam concentrados, mas não utilizam retortas (CASTILHOS; DOMINGOS, 2018; CASTILHOS; DOMINGOS, 2024).

---

<sup>1</sup><https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/pollution-and-health/heavy-metals/mercury/mercury-inventory>

Considerando essas estimativas iniciais, o presente relatório apresenta um novo inventário das emissões e liberações de mercúrio. Este inventário foi elaborado com base em balanços de massa de mercúrio obtidos a partir de trabalhos de campo realizados em quatro tipos de garimpos: baixão, bancadas, balsas e draga. Ao todo, foram realizados 51 balanços de mercúrio, distribuídos entre cinco estados: dezoito (18) no estado do Mato Grosso, dez (10) no estado do Pará, treze (13) no estado do Amapá, seis (6) no Amazonas, e três (3) em Rondônia. Deste total, trinta e cinco (33) foram considerados para compor a base do inventário de uso e perda de mercúrio nos processos produtivos da MAPE de ouro.

O procedimento de medição da perda de mercúrio nas operações visitadas consistiu na pesagem da quantidade total de mercúrio adicionada ao concentrado de ouro pelos operadores antes da amalgamação e da quantidade de mercúrio recuperado após a filtração do amálgama, dependendo do uso de retortas. Essas medições permitiram estimar a fração de mercúrio perdida no processo para subsidiar os cálculos da razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$ . Os balanços de massa foram organizados segundo dois tipos principais de queima do amálgama: do concentrado com uso de retortas e do concentrado sem uso de retortas, possibilitando a análise comparativa dos níveis de emissões atmosféricas e liberação de mercúrio no ambiente em diferentes condições.

O inventário também aponta estimativas ajustadas para o cenário de clandestinidade da produção aurífera e considera a distribuição das perdas por meio receptor (ar, solo/água). Para a estimativa das emissões e liberações, utilizou-se como base a produção média de ouro de origem garimpeira entre os anos de 2020 e 2022, correspondente a 28,63 toneladas/ano. Essa produção foi distribuída proporcionalmente entre os diferentes tipos de amalgamação observados em campo, conforme a participação estimada de cada método na produção total.

## **2. OBJETIVO**

Atualizar o inventário nacional de emissões e liberações de mercúrio originadas da MAPE de ouro no Brasil, com base nos dados atuais coletados em campo durante este Projeto, aplicando a metodologia do inventário nível 2, versão 1.3 do toolkit do PNUMA de identificação e quantificação das emissões e liberações de mercúrio.

### 3. METODOLOGIA PARA O BALANÇO DE MERCÚRIO NO PROJETO

Esta seção apresenta a metodologia adotada em campo para a realização do balanço de massas de mercúrio nas operações visitadas. A eficiência do processo de amalgamação é avaliada por meio da razão entre o mercúrio perdido e o ouro produzido ( $Hg_{\text{Perdido}}:Au_{\text{Produzido}}$ ). Essa métrica permite quantificar as perdas de mercúrio durante o processo de amalgamação em uma determinada região ou país, considerando que a Convenção de Minamata exige a eliminação progressiva da utilização de mercúrio em diversos processos e produtos (VEIGA; BAKER, 2004; PERSAUD; TELMER, 2015; YOSHIMURA; SUEMASU; VEIGA, 2021).

A razão  $Hg_{\text{Perdido}}:Au_{\text{Produzido}}$  é obtida ao se dividir a quantidade de mercúrio perdido pela quantidade de ouro produzida. Em geral, quanto mais eficiente o processo, menor será a quantidade de mercúrio perdido em relação ao ouro produzido. Porém, uma razão elevada indica um uso excessivo e ineficiente do mercúrio, com maiores riscos de contaminação ambiental e impactos à saúde.

A estimativa das emissões e liberações de mercúrio associadas à MAPE de ouro no Brasil foi realizada com base no arquivo Excel da versão 2019 do Inventário Nível 2 do Toolkit do PNUMA (em português), utilizando-se a planilha 5.2 “produção primária (virgem) de metais” e a linha 5.2.2 “extração de ouro e prata com processo de amalgamação”. A linha 5.2.2 é subdividida em: minério inteiro, minério inteiro com uso de retortas, minério concentrado e concentrado com uso de retortas.

#### 3.1. MEDIÇÃO DO USO DE MERCÚRIO NAS OPERAÇÕES VISITADAS

O balanço metalúrgico de mercúrio foi realizado diretamente em campo, sem o apoio de instrumentos analíticos laboratoriais, utilizando uma balança portátil com precisão de 0,1 g. Foram efetuadas as pesagens da quantidade total de mercúrio adicionada no processo e todos os produtos gerados, sendo mercúrio recuperado por filtração manual, peso do amálgama, peso do doré e mercúrio condensado nas operações em que se utilizou retortas. Essas medições permitiram estimar a fração de mercúrio perdida no processo para subsidiar os cálculos da razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$ . A Tabela 1 e Figura 1 resumem as etapas do procedimento metodológico aplicadas no balanço metalúrgico do mercúrio.

**Tabela 1. Etapas de pesagens no balanço metalúrgico do mercúrio**

Item	Avaliação	Identificação	Procedimento
1	Mercúrio que entra no processo	Mercúrio alimentado	Massa do mercúrio pesada antes de ser adicionada ao concentrado para o processo de amalgamação.
2	Mercúrio espremido do amálgama ( <b>Excesso</b> )	Mercúrio Filtrado	Massa do mercúrio pesada após a compressão do amálgama para eliminar o excesso de Hg.
3	Peso do amálgama	Amálgama	O amálgama pesado antes de ser queimado para evaporar o mercúrio.
4	Mercúrio recuperado com a retorta	Mercúrio Condensado	Se for usada retorta, o mercúrio recuperado por condensação.
5	Peso do ouro	Doré	Massa do ouro doré medida após a queima do amálgama, com ou sem uso de retortas.

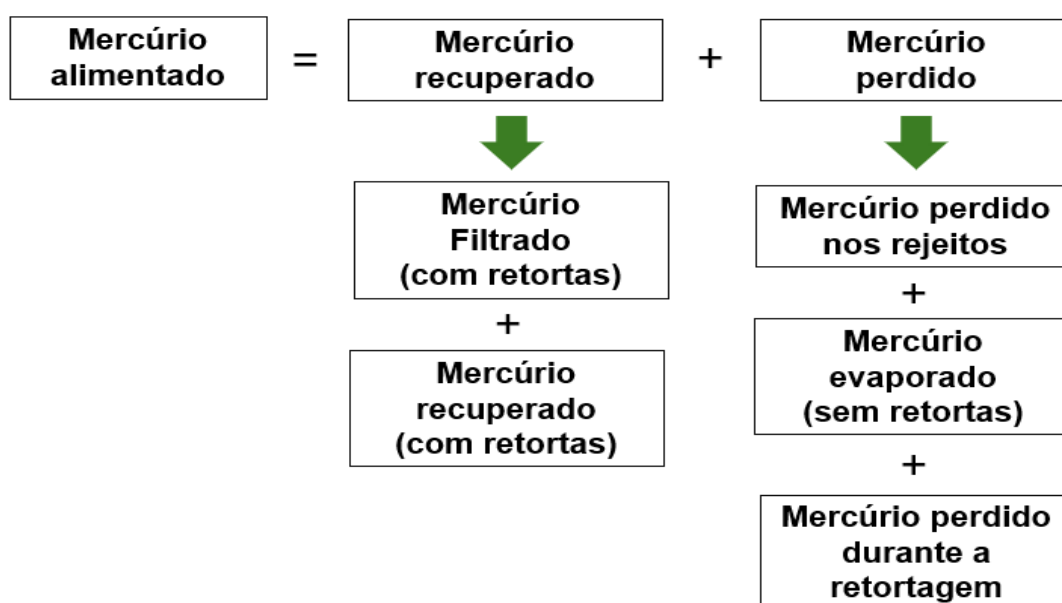
Fonte: Veiga e Baker (2004), adaptado pelos Autores.

As etapas descritas a seguir detalham os procedimentos realizados em campo, conforme apresentado na Tabela 1 e ilustrado na Figura 1. Esta abordagem foi adotada em conformidade com as orientações metodológicas do Toolkit do PNUMA e com base na literatura (VEIGA; BAKER, 2004; CASTILHOS; DOMINGOS, 2018).

- 1. Pesagem do mercúrio alimentado:** massa de mercúrio utilizada no início do processo, antes de sua adição ao concentrado. A medição foi realizada com balanças de precisão de 0,1 g. Sempre que possível, a pesagem foi repetida utilizando a balança disponível na operação.
- 2. Pesagem do mercúrio filtrado:** medição da massa de mercúrio recuperado após o processo de filtração do amálgama.
- 3. Pesagem do amálgama:** determinação da massa do amálgama recuperado após a filtragem, antes da queima para separação do mercúrio por evaporação.

4. **Pesagem do mercúrio condensado:** medição da massa de mercúrio recuperado na retorta, quando este equipamento foi utilizado. Caso a queima tenha ocorrido sem retorta, essa etapa não foi realizada.
5. **Pesagem do ouro doré:** medição da massa do ouro doré após a queima do amálgama, seja com o uso de retortas ou sem o uso de retortas.

**Figura 1. Método de quantificação de mercúrio perdido e recuperado**



Fonte: Elaborado pelos Autores.

### 3.2. LOCAIS DA COLETA DE DADOS

A definição das áreas para a realização da pesquisa de campo foi baseada na triangulação de três aspectos: (i) análise de dados geográficos, (ii) critérios técnicos e analíticos voltados à caracterização da MAPE de ouro, e (iii) articulação prévia com stakeholders locais, como lideranças de cooperativas, órgãos públicos e comunidades locais. O levantamento inicial utilizou dados do Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE), da Agência Nacional de Mineração (ANM), que incluíram os números de processos requeridos e deferidos para lavra de minério de ouro em todo o território nacional.

Esses processos foram classificados conforme o tipo e status do título minerário: autorização de pesquisa, concessão de lavra, permissão de lavra garimpeira (PLG) e licenciamento. A partir dessa análise, foram identificadas as Unidades da Federação com maior relevância para a produção de ouro em áreas legalizadas e/ou com potencial.

A atividade garimpeira de ouro é disseminada no território brasileiro, com expressiva concentração nos estados da região amazônica. Em termos de potencial de emissões e liberações de mercúrio, dados históricos e contextos políticos indicam que a região amazônica reúne as condições mais críticas para ser objeto de estudo. Por esse motivo, a Amazônia Legal foi estabelecida como escopo territorial geral para a coleta de dados e elaboração do inventário de emissões e liberações de mercúrio na MAPE de ouro.

Com base nesse critério territorial e nos dados geoespaciais analisados, foram selecionados os seguintes estados: Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Esses estados representam distintos arranjos garimpeiros, níveis de formalização e tipos de minério explotado. Como parte do planejamento das campanhas de campo, a equipe de coordenação do Projeto realizou reuniões virtuais e presenciais com representantes das federações garimpeiras, cooperativas de garimpeiros e donos de garimpos nos estados selecionados. Este alinhamento teve como objetivo esclarecer os propósitos da pesquisa, apresentar a equipe técnica responsável pela coleta de dados, e detalhar os procedimentos metodológicos a serem adotados durante as visitas.

Dentre os critérios adotados para a seleção final das áreas visitadas, destacou-se a priorização da segurança de acesso para evitar áreas com alto potencial de risco que poderiam comprometer a segurança da equipe e interferir na execução das atividades de campo. Além disso, foram considerados os seguintes aspectos: acessibilidade logística, tipo de minério (primário ou secundário), técnicas de processamento e formas de organização. Os trabalhos de campo foram organizados em seis (6) campanhas de campo, distribuídas em duas etapas, conforme cronograma previamente definido:



- **Primeira etapa:** realizada entre maio e setembro de 2023, com atividades conduzidas nos seguintes Estados: Mato Grosso (Baixada Cuiabana, Alto Guaporé e região Norte), Pará (Tapajós), Amapá (centro-nordeste), Rondônia e Amazonas (Alto e Médio Rio Madeira).
- **Segunda etapa:** realizada entre outubro e novembro de 2023, com visitas complementares no Pará, na região do Sudoeste e em áreas adicionais no Tapajós.

A equipe responsável pela execução das atividades de campo foi composta por dois engenheiros de minas e um engenheiro civil. Durante as visitas, a equipe técnica se apresentou às lideranças das cooperativas locais e responsáveis pelas operações visitadas, em conformidade com os agendamentos prévios e respeito à dinâmica local. É importante enfatizar que o apoio das lideranças garimpeiras na divulgação prévia foi essencial para as campanhas de campo. Em geral, os garimpeiros demonstraram disposição para colaborar com o levantamento, contribuindo com informações técnicas, acesso às áreas e apoio logístico.

No entanto, em algumas ocasiões, houve cancelamentos de última hora por parte dos responsáveis locais, o que exigiu uma reorganização logística imediata e a redefinição do cronograma previamente definido para dar continuidade à coleta de dados. Nas áreas garimpeiras visitadas foram realizadas observações qualitativas para complementar os dados obtidos nos balanços de massa de mercúrio. Em cada operação visitada, foi conduzido um reconhecimento preliminar com o objetivo de identificar a presença de mercúrio retido em equipamentos e verificar fatores pudessem comprometer a aplicação da metodologia.

A equipe de campo registrou os métodos de queima do amálgama utilizados pelos garimpeiros, observando se o processo era realizado com ou sem o uso de retortas. Também foram identificados os pontos onde ocorriam os procedimentos de amalgamação, que variavam de acordo com as especificidades de cada operação. Complementando essas observações, a equipe realizou entrevistas com os donos das frentes de lavra visitadas para entender melhor o contexto socioeconômico das operações. Essas entrevistas forneceram dados sobre o número de trabalhadores envolvidos em cada operação, o custo pago por quilograma de mercúrio e os locais de venda. Esses assuntos são abordados no Volume VII – Diagnóstico dos aspectos operacionais do Projeto Ouro sem Mercúrio.

### 3.3. CRITÉRIOS DE VALIDAÇÃO DOS DADOS COLETADOS EM CAMPO

No total, foram realizados 51 balanços de mercúrio, distribuídos entre cinco estados: dezoito (18) em Mato Grosso, dez (10) no Pará, quatorze (14) no Amapá, seis (6) no Amazonas, e três (3) em Rondônia. A Tabela 2 apresenta a distribuição dos balanços de massa.

**Tabela 2. Total de balanços de massa realizados em campo**

Grupo	Tipo de amalgamação	Estado	Nº de balanços de mercúrio
Queima do amálgama com uso de retortas	Concentrado	Amapá	4
		Amazonas	3
		Mato Grosso	17
		Pará	5
		Rondônia	3
		<b>Subtotal</b>	<b>32</b>
Queima do amálgama sem uso de retortas	Concentrado	Amapá	4
		Pará	5
		<b>Subtotal</b>	<b>9</b>
Queima do amálgama em capela com exaustão nas casas de compra de ouro	Todo o minério	Amapá	5
		<b>Subtotal</b>	<b>5</b>
Queima do amálgama em capela com exaustão nas casas de compra de ouro	Concentrado	Amazonas	3
		Amapá	1
		Mato Grosso	1
		<b>Subtotal</b>	<b>5</b>
		<b>Total</b>	<b>51</b>

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Do total de balanços realizados, 32 foram conduzidos em operações com queima do amálgama com uso de retortas, 9 em operações sem o uso de retortas, e 10 em garimpos cuja etapa de queima do amálgama ocorreu em capelas localizadas em Postos de Compra de Ouro (PCOs), que são unidades credenciadas como Distribuidora de Títulos e Valores Mobiliários (DTVM). Os dados passaram por análise de consistência, sendo considerados apenas os registros validados. Os balanços que não atenderam aos critérios técnicos foram excluídos dos cálculos.

Quatro (4) balanços realizados em operações com concentrado e uso de retortas, e dois (2) balanços de concentrado sem o uso de retortas, foram desconsiderados devido a inconsistências causadas por falhas nas balanças utilizadas em campo. Três (3) balanços realizados com uso de retortas em operações de dragas no leito do Rio Madeira, em Rondônia, foram excluídos por apresentarem valores de recuperação de mercúrio superiores à quantidade inicialmente adicionada ao processo. Esses resultados em Rondônia são atribuídos à presença de mercúrio no leito do rio, que foi capturado durante o processamento mineral, conforme observado pela equipe técnica durante a execução dos balanços. Isso evidencia que, em determinadas circunstâncias, operações de dragagem não apenas utilizam mercúrio, mas também podem remover quantidades previamente depositadas em ambientes subaquáticos. Isso ocorre em função da alta densidade do mercúrio, que pode ser retido nos tapetes acoplados nas calhas concentradoras. Resultados semelhantes foram reportados por Balzino et al. (2015).

Os (5) balanços em que a queima do amálgama foi realizada em casas de compra de ouro no Amapá, os dados não foram considerados para análise, uma vez que os operadores utilizaram placas de cobre recobertas com mercúrio para amalgamação de todo o minério. Nesses casos, a média de doré produzido foi muito baixa, com o valor mínimo de 0,50 g e um valor máximo de 1,40 g. Os 5 balanços de concentrado com a queima do amálgama em capela com exaustão nas casas de compra de ouro no Amazonas, Amapá e Mato Grosso foram desconsiderados. Isso se deve ao fato de que o mercúrio era condensado nos tanques de armazenamento e, para que fosse realizado o balanço completo, seria preciso limpar os tanques, o que não foi logisticamente viável durante as visitas de campo.

#### 4. REFERENCIAL TEÓRICO

O mercúrio é um metal líquido à temperatura ambiente que ocorre naturalmente na crosta terrestre. O metal é liberado por processos naturais, como emissões de gases do manto terrestre, erupções vulcânicas, evaporação nos oceanos e fontes geotérmicas. Embora essas fontes naturais continuem contribuindo para o ciclo global do mercúrio, a intensificação das atividades antrópicas provocou um aumento das concentrações atmosféricas e nas descargas de mercúrio em ambientes terrestres e aquáticos (DRISCOLL et al. 2013).

As liberações de mercúrio podem acontecer em todas as fases do ciclo de vida de um produto que contenha mercúrio adicionado ou de um processo que utilize mercúrio. Por ser um elemento químico, não é formado nem degradado durante seu ciclo de vida, embora possa mudar de forma, de modo que a quantidade total de entradas de mercúrio será igual ao total de saídas. Dessa forma, as liberações de mercúrio de uma determinada atividade humana podem ser vista como a distribuição consecutiva da entrada original de mercúrio para diversos meios ou vias de liberação durante as várias fases do ciclo de vida do produto ou processo (PNUMA, 2015).

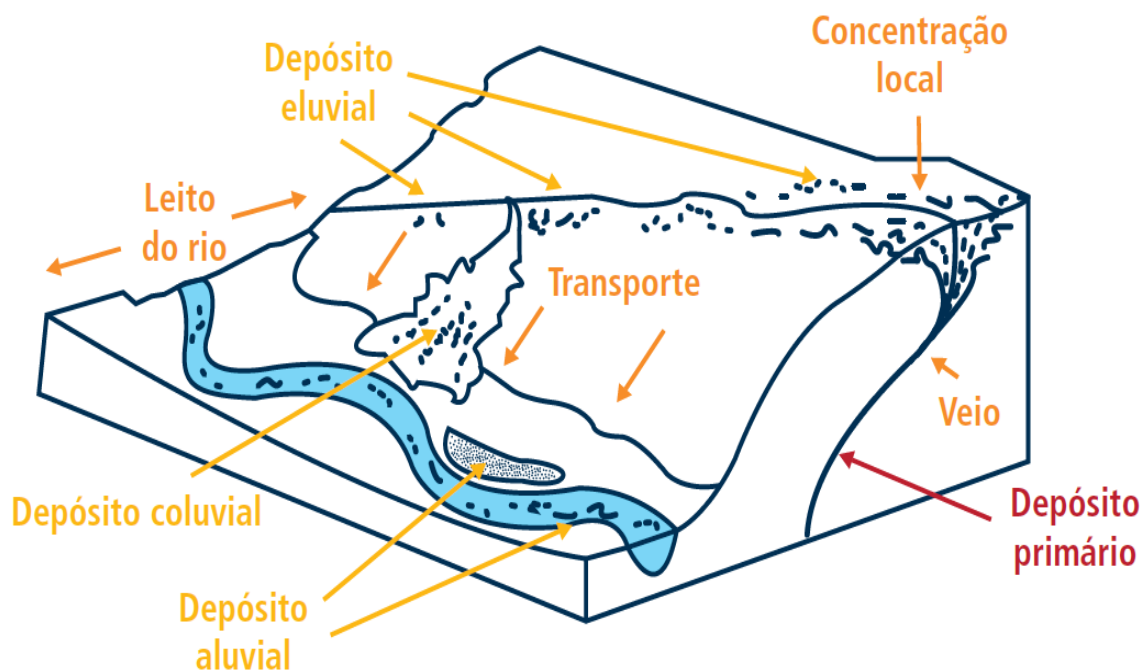
Uma característica que distingue o mercúrio de outros metais comumente encontrados na atmosfera é sua capacidade de reemissão para o ar, mesmo após ter sido depositado nas superfícies terrestres ou aquáticas (LINDQVIST; RODHE, 1985; SCHROEDER; MUNTHER, 1998). O mercúrio pode entrar na atmosfera por meio da liberação de mercúrio vapor proveniente de rochas, solos e água. Devido à sua natureza volátil, o mercúrio depositado pode retornar à atmosfera na forma elementar ( $Hg^0$ ), reiniciando seu ciclo biogeoquímico (SELIN; SELIN, 2022). Este processo é definido como emissão (*emission* em inglês). Quando o mercúrio é depositado no ambiente terrestre ou aquático, costuma-se chamar de “deposição” ou “liberação” (*release*, em inglês). Devido à sua capacidade de reemissão e ao longo tempo de permanência na atmosfera, que pode variar de alguns dias a vários anos, o mercúrio é classificado como poluente global (AMAP/UNEP, 2015). Isso significa que, uma vez introduzido na sociedade e na biosfera por atividades humanas, o mercúrio não se degrada ou desaparece em escalas de tempo comparáveis à vida humana.

#### 4.1. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS DA MAPE DE OURO

As ocorrências de ouro apresentam características geológicas e físico-químicas variadas por causa da sua composição, resistência à corrosão, alta gravidade específica, brilho (alta refletância), durabilidade, condutividade térmica e elétrica e maleabilidade. O minério de ouro aproveitado pela MAPE brasileira é predominantemente proveniente de depósitos secundários, embora alguns depósitos primários sejam lavrados (Figura 2). Os depósitos primários de ouro ocorrem em veios de quartzo auríferos associados a rochas magmáticas ou metamórficas e são extraídos, via de regra, por métodos de lavra subterrânea.

Os depósitos secundários de ouro resultam do intemperismo de depósitos primários, seguido do transporte de materiais não consolidados. Podem ser classificados como eluviais (depósitos de minério localizados em colinas ou montanhas), coluviais (sedimentos grossos transportados pela gravidade das encostas e montanhas) ou aluviais (margens ou leitos de rios).

Figura 2. Distribuição dos métodos de extração de garimpo de ouro



Fonte: NAP.Mineração (2021), baseado na apresentação de Mathis, Grelo e Peregovich (2005).

No garimpo de ouro, o método mais comum é a lavra a céu aberto, aplicada ao aproveitamento de depósitos secundários. Nessas operações, os garimpeiros utilizam tratores e retroescavadeiras para remoção do solo. Posteriormente, com o uso de mangueiras de 4 a 6 polegadas de diâmetro, é feito o jateamento de água em alta pressão para desagregação dos sedimentos. A polpa resultante desse processo consiste em uma mistura de água com os sólidos em suspensão, que é transportada por um conjunto de tubulação formado por mangueiras acopladas até a calha concentradora, onde, por diferenças de peso e densidade, o ouro é retido.

Além da lavra superficial, o ouro aluvial também é extraído do leito de rios por meio de sistemas de sucção instalados em balsas ou dragas. Esse método consiste na extração do cascalho do fundo do rio por sucção, com auxílio de mangueiras com até 8 polegadas de diâmetro, conduzidas manual ou mecanicamente, controlando a altura e o fluxo de cascalho que entra no tubo submerso.

Os depósitos primários são explorados por lavra subterrânea. O ouro primário em rocha dura pode ser extraído, por exemplo, usando dinamite seguida de fragmentação do minério em partículas menores em britadores de mandíbulas e/ou moinhos de martelos. Nesses casos, a lavra subterrânea é feita em garimpos denominados “filão” (termo localmente utilizado nos garimpos brasileiros), com a abertura de poços subterrâneos e galerias em depósitos de rochas competentes e, por isso, a maioria das operações utiliza explosivos.

#### **4.2. EMISSÕES DE MERCÚRIO NO PROCESSO DE AMALGAMAÇÃO DE OURO**

A amalgamação é uma técnica utilizada na recuperação de ouro, baseada na propriedade físico-química da molhabilidade, que envolve a interação entre interfaces líquidas, sólidas e gasosas. No caso da extração de ouro, essa propriedade é expressa pelo contato da superfície do ouro em meio aquoso. Sendo assim, uma característica influenciada pelo ângulo de contato entre ouro, mercúrio e água (Au-Hg-H<sub>2</sub>O). Essa formação está condicionada à limpeza da superfície do ouro, consistência das gotas de mercúrio e efetividade do contato ouro-mercúrio (VEIGA et al., 1991). Na prática dos garimpos, a amalgamação varia conforme o tipo de minério e a escala de produção, sendo possível identificar dois métodos principais:

- (i) amalgamação de concentrados
- (ii) amalgamação de todo o minério (Whole Ore Amalgamation – WOA).

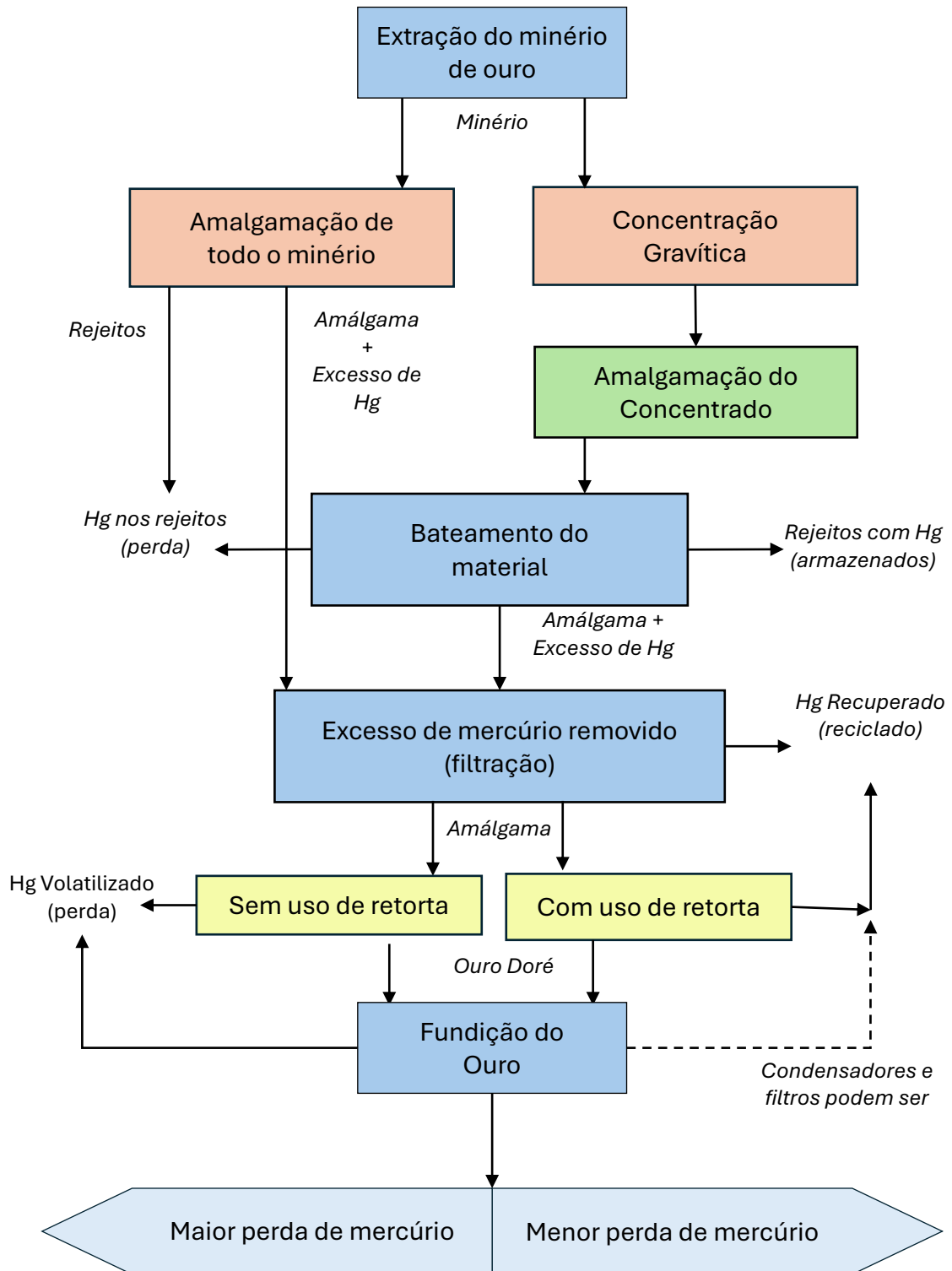
Ambas as técnicas envolvem o uso de mercúrio, porém diferem em relação às quantidades e formas de uso. A técnica de amalgamação de todo o minério é normalmente observada no Brasil e em outros países, quando se processa minério primário de alto teor de ouro. Os minérios secundários, por terem baixos teores, são normalmente concentrados antes da amalgamação. As principais características de cada método estão resumidas na Tabela 3 e na Figura 3.

**Tabela 3. Métodos de amalgamação utilizados para extração de ouro**

Método	Descrição	Equipamentos	Razão Au:Hg	Impacto ambiental
<b>Amalgamação de concentrados</b>	Adição de mercúrio nos concentrados dos processos gravíticos	Misturadores, barris rotativos	1:3	Alto potencial de impacto ambiental na queima do amálgama
<b>Amalgamação de todo o minério</b>	Adição de mercúrio no fluxo contínuo de polpa no circuito de moagem	Calhas concentradoras, placas de cobre recobertas com mercúrio	1:5 1:10-30	Alto potencial de impacto por causa dos rejeitos contaminados

Fonte: Telmer; Veiga, 2009, UNEP (2012), Yoshimura; Suemasu; Veiga (2021), adaptado pelos Autores.

Figura 3. Métodos de amalgamação utilizados para extração de ouro



Fonte: Veiga e Hilton (2002), adaptado pelos Autores.

A seguir, descrevem-se as características técnicas desses dois métodos, representados também no diagrama da Figura 3.



- (i) **Amalgamação dos concentrados:** consiste na concentração do material extraído por métodos gravíticos. Após a pré-concentração, o mercúrio é misturado aos concentrados em caixas d'água ou barris, e a formação do amálgama é realizada manualmente, com o uso de bateias para a separação dos minerais pesados. A quantidade de mercúrio adicionada varia de acordo com a experiência do operador. Em muitos casos, um grande excesso de mercúrio é adicionado ao concentrado e pouco ouro é produzido. Vale ressaltar que, em todos os casos, a maior parte do mercúrio adicionado não se combina com o ouro e é recuperado na filtração manual, em um pedaço de pano, para retirada do excesso de mercúrio.
- (ii) **Amalgamação de todo o minério:** consiste na adição direta do mercúrio metálico ao minério bruto em diferentes etapas do processo produtivo, podendo todo o material ser amalgamado com placas de cobre ou moinhos de bolas. Este último é comum nos países do Pacífico da América do Sul e Central, assim como na Indonésia, mas não foi observado no Brasil. A perda de mercúrio, principalmente com os rejeitos, é substancial nesses casos.

Após a formação do amálgama, independentemente do método utilizado, é feita a etapa de bateamento do material e a filtração (*squeezing*, em inglês) para remover o excesso de mercúrio metálico (UNEP, 2009). Esse processo é tradicionalmente realizado de forma manual pelos garimpeiros, que utilizam pedaços de pano ou tecido para espremer mecanicamente o amálgama, separando o mercúrio livre da massa.

O amálgama resultante dessa filtração manual apresenta, em média, entre 40 e 50% de mercúrio, e entre 50 e 60% de ouro e outros metais associados (HINTON; VEIGA; VEIGA, 2003; UNEP, 2012). A eficiência da filtração varia de acordo com a força aplicada: quanto maior a compressão, maior a remoção do mercúrio livre, resultando em um amálgama mais denso e concentrado. No entanto, uma filtragem inadequada e com pouca força para compressão pode resultar em amálgamas com maior teor de mercúrio, aumentando o potencial de emissões durante a etapa de queima. As maiores emissões de mercúrio no processo de amalgamação ocorrem principalmente durante a decomposição térmica do amálgama, também denominada pirólise, quando o amálgama é aquecido para produzir o *doré*, que é o ouro ainda impuro e não refinado.

Nessa etapa, o mercúrio metálico presente no amálgama volatiliza-se, e, na ausência de mecanismos adequados de contenção e condensação, é liberado (emitido) para a atmosfera caso não haja mecanismos adequados de contenção e condensação. A decomposição térmica do amálgama pode ser realizada por três métodos distintos:

- (i) queima ao ar livre com o auxílio de maçaricos sem uso de retortas ou condensadores de vapores de mercúrio;
- (ii) queima em retortas para condensação do mercúrio; e
- (iii) queima em capelas com exaustão com ou sem tanques de água conectados para condensação dos vapores de mercúrio.

Se as temperaturas de aquecimento do amálgama forem baixas, como no caso de queimas a céu aberto realizadas ao ar livre, ou quando o tempo de exposição ao calor é curto, o doré final pode conter até 20% de mercúrio residual. Mesmo os processos considerados adequados, o doré ainda pode conter de 2 a 5% de mercúrio no concentrado final (VEIGA; HINTON, 2002). A queima do amálgama pode ocorrer diretamente nos próprios garimpos, em estruturas conhecidas como centrais de amalgamação. Nessas centrais, a decomposição térmica do amálgama é realizada com ou sem uso de retortas ou capelas, dependendo das condições técnicas e do nível de capacitação dos operadores.

Além disso, a queima do amálgama também pode ocorrer nos postos de compra de ouro, denominados PCOs. Nesses locais, o doré é fundido com bórax para eliminar o mercúrio residual e remover possíveis silicatos associados ao metal. Posteriormente, o doré é transformado em barras e pesado para pagamento aos vendedores.

#### **4.3. RAZÃO MERCÚRIO PERDIDO E OURO PRODUZIDO**

O Artigo 7 da Convenção de Minamata estabelece que cada parte signatária, em cujo território sejam realizadas atividades de mineração e processamento de ouro artesanal e em pequena escala sujeitas, deverá adotar medidas para reduzir, e se possível eliminar, o uso de mercúrio e compostos de mercúrio nessas atividades, bem como as emissões e liberações de mercúrio no meio ambiente resultantes dessas atividades.

Desenvolver uma compreensão quantitativa do uso de mercúrio no setor da MAPE de ouro é uma tarefa complexa. Devido à incerteza inerente nas estimativas, os países geralmente usam vários cálculos para determinar a produção de ouro, com o objetivo de triangular ou fornecer uma faixa de estimativas que se aproxime da produção “verdadeira” no setor (O'NEILL; TELMER, 2017).

Uma das métricas utilizadas para quantificar as perdas de mercúrio durante o processo de amalgamação é a razão **Mercúrio Perdido por Ouro Produzido** ( $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$ ). Essa métrica é definida como a quantidade de mercúrio, em gramas, que é utilizada ou perdida no meio ambiente para a produção de 1 g de ouro.

Quando apenas os concentrados gravíticos são amalgamados, a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  varia normalmente entre 0,1 e 1 dependendo da habilidade do operador em filtrar manualmente o amálgama, do processo de separação do amálgama com excesso de mercúrio dos minerais pesados (normalmente por bateamento) e do processo de decomposição do amálgama (com ou sem retortas).

Quando todo o minério é amalgamado em placas de cobre recobertas com mercúrio, a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  varia entre 1,5 e 3, podendo ser maior dependendo da quantidade de prata no minério. Quando todo minério é amalgamado adicionando mercúrio a moinhos de bolas, a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  pode variar, entre 6 e 25, e chegar a 50:1 quando o minério é rico em prata (VEIGA, BAKER, 2004, CORDY et al., 2011, UNEP, 2012; GARCIA et al., 2015, YOSHIMURA; SUEMASU; VEIGA, 2021).

Os autores Yoshimura, Suemasu e Veiga (2021) estimaram a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  em diferentes continentes, utilizando dados oficiais de produção de ouro e importação de mercúrio de alguns países selecionados onde se pode obter informações. Os resultados mostram que a razão média de  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  na MAPE de ouro foi estimada em 1,96 na África, 4,63 na América Latina e 1,23 na Ásia, com uma média mundial de 3,5. Os autores verificaram que as maiores perdas de mercúrio foram observadas em países do Pacífico da América do Sul, América Central e Ásia, devido ao uso frequente da técnica de amalgamação de todo minério.

O *Global Mercury Project* realizou uma avaliação das emissões de mercúrio no Brasil, Indonésia, Laos, Tanzânia, Sudão e Zimbábue. No Brasil, os estudos de campo foram conduzidos nas localidades de São Chico e Creporizinho, no Tapajós estado do Pará (Tabela 4).

**Tabela 4. Perdas de mercúrio nas localidades do Global Mercury Project**

País	Localidade	Hg <sub>Perdido</sub> :Au <sub>Produzido</sub>	Hg perdido (t/ano)	Preço US\$/kg
Brasil	São Chico	1.5 – 3	0.03 a 0.04	15 – 30
Brasil	Crepurizinho	1 – 1.5	0.3 a 0.5	15 – 30
Indonesia	Galangan	1 – 2.5	0.3 a 0.5	9 – 12
Indonésia	Talawaan	60 – 90	20 a 30	10 – 15
Laos	Luang	0.3 – 0.5	0.001 a	75 – 88
	Prabang		0.002	
Tanzânia	Rwamagasa	1 – 1.5	0.3 a 0.4	25 – 30
Sudão	Blue Nile	1 – 1.5	0.03 a 0.06	18 – 25
Zimbábue	Kadoma	1 -3	3 a 5	25 – 25*

\*O preço depende da quantidade comprada

Fonte: Veiga e Baker (2004), adaptado pelos Autores.

Os valores apresentados foram estimados com base em observações de campo e relatórios. Em São Chico, a razão **Hg<sub>perdido</sub>:Au<sub>produzido</sub>** variou entre 1,5 e 3 com perdas de mercúrio estimadas em 0,03 e 0,04 toneladas por ano. Esse valor elevado está associado à prática de amalgamação de todo o minério com o uso de placas de cobre. No Creporizinho, a razão foi menor, ente 1 e 1,5, devido que a amalgamação era realizada apenas nos concentrados gravimétricos, mas as retortas para queima do amálgama não eram utilizadas. Nesse caso, as perdas de mercúrio foram estimadas em 0,03 e 0,05 toneladas por ano (VEIGA; BAKER, 2004).

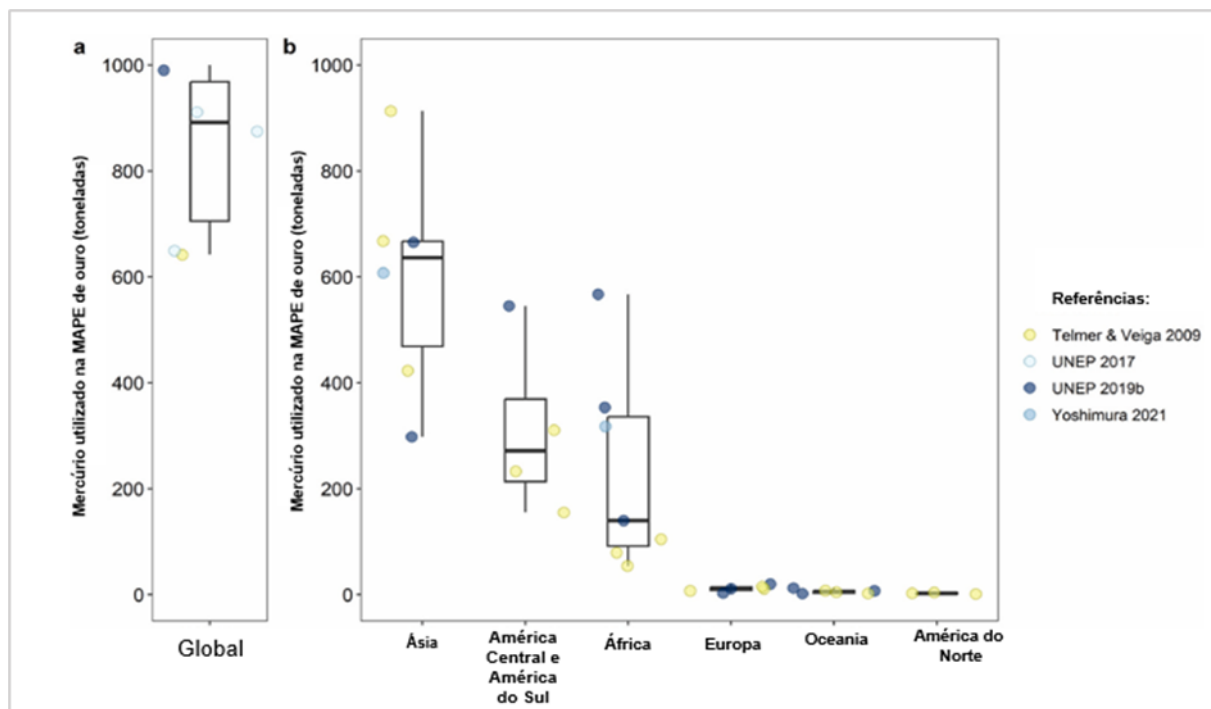
Entre os casos analisados, destaca-se a situação em Sulawesi, na Indonésia. Nessa localidade, é prática comum adicionar 1 kg de mercúrio em um moinho de aço (cheio de bolas, barras ou pedras) para moer 40 kg de minério por 5 horas. As perdas de mercúrio para este método são estimadas em cerca de 1,5 kg por 30 moinhos/dia. Isso faz com que a razão **Hg<sub>perdido</sub>:Au<sub>produzido</sub>** seja igual a 100 (VEIGA; BAKER, 2004).

Os autores Cheng et al. (2023) propuseram uma estimativa global de produção de ouro e de emissões e liberações de mercúrio. A metodologia do estudo incluiu revisão da literatura existente com foco nos dados sobre produção de ouro, uso de mercúrio e emissões. De acordo com o estudo, a produção global da MAPE de ouro varia entre 380 e 870 toneladas de ouro por ano, com uma média global de 520 toneladas de ouro por ano.

A Ásia é responsável por uma produção estimada entre 120 e 480 toneladas/ano, com uma média de 304 toneladas/ano. A América Central e a América do Sul produzem entre 67 e 255 toneladas/ano, com média de 150 toneladas/ano. Em relação ao mercúrio, os atores apontaram que globalmente, entre 640 e 1000 toneladas de mercúrio são usadas anualmente pela MAPE de ouro no mundo, com média de 892 toneladas anuais (Figura 4). Desse total, estima-se que aproximadamente 615 toneladas de mercúrio (69%) são emitidas para a atmosfera e o restante (31%) perdido nos rejeitos. No nível regional, a Ásia perde entre 298 e 913 toneladas por ano, com uma média de 636 toneladas/ano de mercúrio (CHENG et al., 2023).

Na América Central e América do Sul, as perdas de mercúrio variam entre 155 e 545 toneladas/ano, com uma média de 272 toneladas/ano. Na África, o uso do mercúrio varia entre 54 e 567 toneladas/ano, com uma média de 140 toneladas/ano. Em outras regiões do mundo, as perdas são menores. O estudo também identificou discrepâncias entre os países com maiores perdas de mercúrio. Destacam-se, nesse contexto, China, Peru, Colômbia, Bolívia, Sudão, Venezuela e Sudão (CHENG et al., 2023).

**Figura 4. Quantidade de mercúrio usado na MAPE de ouro**



Fonte: Cheng et al. (2023), adaptado pelos Autores.

Considerando que Yoshimura, Suemasu e Veiga (2021) estimaram a média global para a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  em **3,5**, e que Cheng et al. (2023) calcularam que a produção média global de ouro é de 520 toneladas/ano, é possível estimar que as perdas globais de mercúrio no ambiente devido à MAPE de ouro são de aproximadamente 1.820 toneladas por ano. Esse valor se aproxima das estimativas de 2015 do Global Mercury Assessment, que calculou perdas globais de 2.220 toneladas de mercúrio por ano, sendo 838 toneladas para a atmosfera, além de 1.220 toneladas liberadas para água e solo (UNEP, 2019).

Além das estimativas globais, estudos de campo como o de Cordy et al. (2011), demonstram a importância da medição direta das perdas. Esses autores realizaram balanços metalúrgicos de mercúrio em 15 operações na MAPE de ouro nos municípios de Segovia, Remedios, Zaragoza, El Bagre e Nechí, na Colômbia. O estudo envolveu a pesagem do mercúrio antes e após o processo de amalgamação e as perdas por evaporação durante a queima do amálgama. Nesse caso, os operadores não concentravam o minério, adicionando o mercúrio diretamente ao material bruto em moinhos de bolas.

Os resultados do estudo de Cordy et al. (2011), indicaram que, em média, os operadores adicionavam cerca de 78 gramas de mercúrio para processar 60 kg de minério em moinhos de bolas, obtendo aproximadamente 2,5 gramas de ouro por operação. Nesse contexto, a razão média  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  foi de 14,6, indicando um uso excessivo e ineficiente de mercúrio no processo. O balanço de massa mostrou que cerca de 50% do excesso de mercúrio poderia ser recuperado pela filtração do amálgama. Isso é uma indicação de que os operadores adicionavam mercúrio em quantidade superior à necessária.

Cerca de três anos após o estudo de Cordy et al. (2011), os autores Garcia et al. (2015) repetiram o balanço de mercúrio na Colômbia, após sugerirem alterações nos procedimentos de amalgamação. Apenas 40% das 15 operações amostradas em 2010 foram avaliadas no novo estudo. A queima do amálgama era feita com maçarico de propano sem o uso de condensadores ou filtros, liberando os vapores de mercúrio para o ambiente. Os rejeitos contaminados com mercúrio eram coletados e submetidos a processo de cianetação para recuperação do ouro. Com a implementação de medidas como a adição de mercúrio ativado em menor quantidade e a redução da velocidade de rotação de cada moinho, os resultados foram diferentes.

O balanço de mercúrio indicou que a quantidade média de mercúrio adicionado foi reduzida de 78,1 g para 44,3 g, representando uma redução de 43% em relação aos níveis registrados em 2010. A razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  em 2010 foi, em média 14,6, e foi reduzida em 55%, para cerca de 6,5 (GARCIA et al. 2015).

Velásquez-López, Veiga e Hall (2010) realizaram um estudo para estimar a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  em Portovelo-Zaruma, na província de El Oro, Equador. Na região, havia 87 centros de processamento que realizavam a amalgamação de todo o minério em moinhos de bolas. Os resultados indicaram que a amalgamação de todo minério gerava uma razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  de 12. Esses estudos demonstram que os níveis mais altos de perdas de mercúrio ocorrem, principalmente, quando todo o minério é amalgamado em moinhos de bolas, onde o mercúrio se pulveriza e se perde com os rejeitos, que em muitos casos são cianetados, gerando o composto  $Hg(CN)_2$  (aq), altamente tóxico.

A Tabela 5 apresenta uma síntese comparativa dos diferentes métodos de amalgamação e suas perdas de mercúrio.

**Tabela 5. Método de amalgamação define as perdas de mercúrio**

Método de amalgamação	Razão $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$
Todo minério em placas de cobre ou em moinhos sem retorta	6 a 15
Todo minério em placas de cobre ou em moinhos sem retorta	3,00
Somente concentrados sem retortas	1,00
Somente concentrados com retortas	<0,1

Fonte: Veiga e Hinton (2002), Cordy et al. (2011), Garcia et al. (2015), elaborado pelos Autores.

Fritz et al. (2023) estimaram o uso de mercúrio em 47 locais ao longo do Rio Tapajós, no Pará, entre os anos de 2018 e 2022. O estudo incluiu visitas em minas informais e, em alguns casos, ilegais. Os dados foram obtidos por meio de visitas de campo, medições diretas e entrevistas com operadores.

Os resultados indicaram uma razão de **Hg**<sub>perdido</sub>: **Au**<sub>produzido</sub> de 0.19, com uma média de 1,7 kg de mercúrio utilizado por quilograma de ouro produzido. Os autores atribuem essa baixa taxa de perda ao uso de retortas, que podem reter pelo menos 75% do mercúrio, dependendo da qualidade da retorta e da experiência dos operadores.

Recentemente, foram realizadas avaliações de perdas de ouro e mercúrio em Uke, cidade localizada no Estado de Nasarawa, Nigéria. O balanço de mercúrio em 16 pontos de amalgamação indicou que, em média,  $15,8 \pm 25,8\%$  do mercúrio inicial adicionado ao processo é emitido para a atmosfera e  $26,0 \pm 32,8\%$  é perdido com os rejeitos. Nos mesmos 16 pontos estudados, os amálgamas apresentaram, em média,  $76,5 \pm 38,12\%$  de mercúrio em sua composição (ANENE; DANGULBI; VEIGA, 2024).

A literatura aponta que esse é um valor alto, sendo que, quando amálgamas são bem espremidos manualmente, geralmente contêm 40%–50% de mercúrio e 50%–60% de ouro. Assim, amálgamas com mais de 40% de mercúrio indicam que o excesso de mercúrio, não combinado com os metais preciosos, não foi adequadamente removido na filtração manual. A razão **Hg**<sub>perdido</sub>:**Au**<sub>produzido</sub> foi de  $3,35 \pm 9,46$ , um valor notavelmente alto, pois essa razão normalmente deve estar em torno ou abaixo de 1, quando apenas os concentrados são amalgamados e não se utilizam retortas. Uma das razões para esse resultado é a perda de quase 26% de mercúrio com os rejeitos de amalgamação, o que denota que o processo de separação em bateia do amalgama com excesso de mercúrio dos minerais pesados não está sendo bem realizado (ANENE; DANGULBI; VEIGA, 2024).

Um ponto de atenção na avaliação das emissões de mercúrio é o uso da razão **Hg**<sub>usado</sub>:**Au**<sub>Produzido</sub>. Essa métrica não indica, necessariamente, a quantidade de mercúrio perdido, uma vez que parte do mercúrio usado (adicionado) no processo pode ser recuperado na filtração ou retortagem (quando se utilizam retortas) e reutilizado. Outro aspecto está relacionado à produção de ouro utilizada no cálculo da razão. Quando a produção de ouro é muito baixa, a razão **Hg**<sub>perdido</sub>:**Au**<sub>produzido</sub> tende aumentar significativamente. Em operações com produção inferior a 1 grama de ouro, a **Hg**<sub>perdido</sub>:**Au**<sub>produzido</sub> resultam em variações na razão, distorcendo a estimativas de eficiência do processo. Por esse motivo, recomenda-se excluir, nas análises estatísticas, dados de operações com produção muito baixa de ouro.



#### 4.4. PERDAS DE MERCÚRIO NA AMALGAMAÇÃO

As maiores perdas de mercúrio durante o processo de amalgamação ocorrem em condições operacionais inadequadas. Entre os principais fatores estão a amalgamação de todo o minério em moinhos de bolas, onde o atrito pode pulverizar o mercúrio e comprometer a coalescência, especialmente quando o ouro não está liberado. Perdas ocorrem quando o ouro não está liberado da ganga, impedindo a formação do amálgama ou quando o mercúrio encontra-se oxidado, perdendo sua capacidade de coalescência. Outros fatores que contribuem para ineficiência do processo incluem a presença de gordura natural (matéria orgânica) ou argila na superfície do ouro, dificultando sua eficiência no processo. Além disso, partículas de ouro muito laminares podem flutuar sobre o mercúrio sem amalgamar, comprometendo a recuperação (VEIGA; GUNSON, 2020).

Estudos demonstram que essas perdas podem ser reduzidas quando a amalgamação é realizada somente em concentrados, com o uso do mercúrio previamente ativado, e, principalmente, com a utilização de retortas ou capelas para condensar e reciclar o mercúrio vaporizado durante a decomposição térmica do amálgama (UNEP, 2012; ESDALIE; CHALKER, 2018).

## 5. BASE DE DADOS OBTIDOS NO PROJETO OURO SEM MERCÚRIO

Nesse item são apresentados uma síntese de informações sobre produção de ouro no Brasil, comércio de mercúrio, uso de retortas, dados de população garimpeira e grau de informalidade. Os dados são apresentados em maiores detalhes no Volume II – Diagnóstico da matriz normativa e das políticas públicas, Volume VII – Diagnóstico dos aspectos econômicos e Volume VII – Diagnóstico dos aspectos operacionais do Projeto Ouro sem Mercúrio.

### 5.1. PRODUÇÃO DE OURO NO BRASIL

Existem diversas fontes relativas à produção de ouro ao longo dos anos, com dados que mostram números semelhantes e quando ocorrem discrepâncias, são menos impactantes para o valor global do que aquelas da MAPE de ouro que ocorrem invariavelmente no mundo todo. Estima-se que a produção total de ouro declarada no Brasil, entre 2018 e 2023, foram de 337,482 kg/a (Tabela 6).

Em 2023, o Brasil adotou medidas para controlar o comércio de ouro e combater a extração ilegal, que impactou diretamente na produção legal de origem garimpeira. Após essas mudanças, a produção do garimpo registrou uma queda de 13,4 toneladas, redução de aproximadamente 45,3%, em relação a 2022.

**Tabela 6. Produção de ouro no Brasil no período de 2018 - 2023**

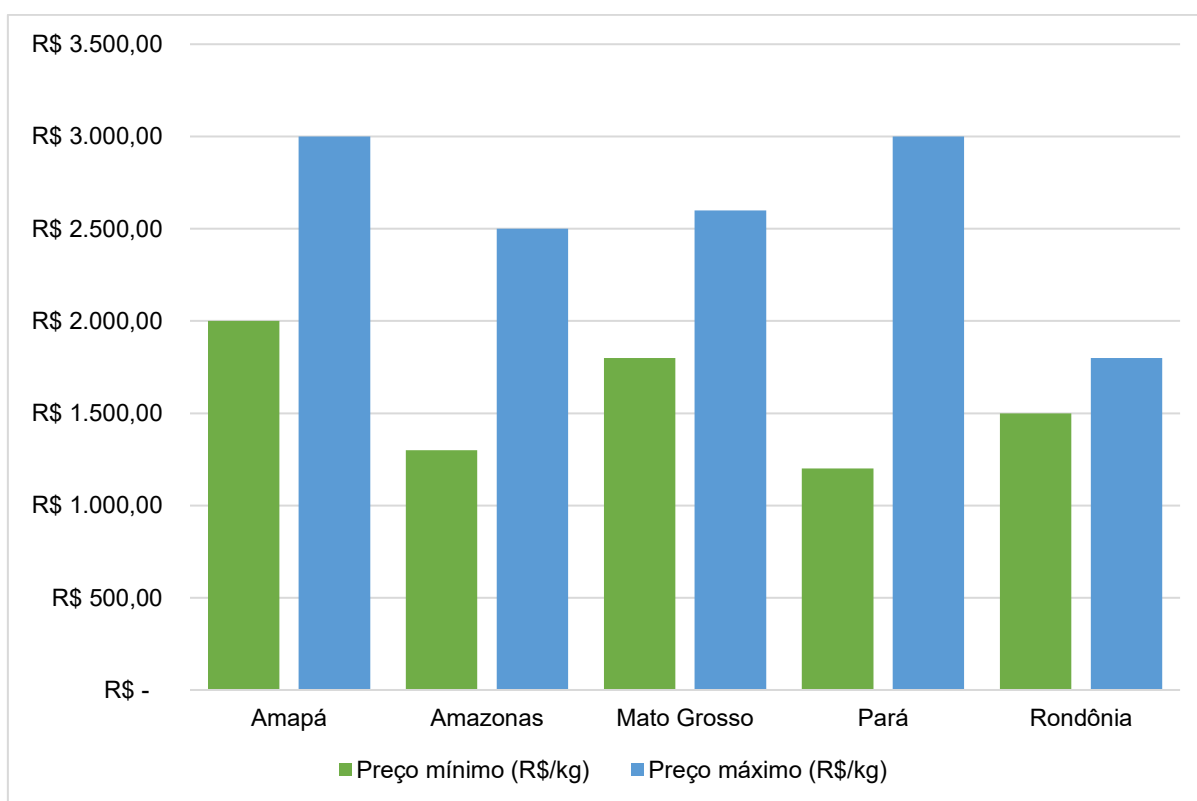
Ano	Produção Total (kg)	Produção Declarada (kg)	Percentual Declarado (%)	Produção garimpo (kg)	Fonte
2018	83.070	69.648	83,8%	13.422	Sumário Mineral Brasileiro, 2019
2019	86.897	72.501	83,4%	14.396	Sumário Mineral Brasileiro, 2020
2020	96.849	74.457	76,9%	22.392	Sumário Mineral Brasileiro, 2021
2021	94.649	62.215	65,7%	32.434	Anuário Mineral Brasileiro, 2022
2022	89.422	58.661	65,6%	30.761	Estimado Instituto Escolhas
2023	75.942	59.103	77,8%	16.839	Estimado Instituto Escolhas

Fonte: Volume II – Diagnóstico da matriz normativa e das políticas públicas do Projeto Ouro sem Mercúrio.

## 5.2. OFERTA DE MERCÚRIO

Os preços do mercúrio no Brasil podem variar conforme a região. A partir das entrevistas realizadas com donos de garimpos, foi possível identificar essas variações com base nas quantidades mensais adquiridas nos estados visitados pela equipe de campo do projeto. A média mensal de mercúrio comprado por mês foi de 570 gramas. O valor máximo registrado em uma unidade de processamento foi de 3.000 g e o valor mínimo de 30 gramas por mês. A Figura 5 ilustra a variação dos preços mínimos e máximos praticados para a compra do mercúrio (R\$/Kg) nos locais visitados.

**Figura 5. Preços mínimos e máximos na compra do mercúrio (R\$/Kg)**



Fonte: Elaborado pelos Autores.

No Amapá, os valores de comercialização variaram entre R\$ 2.000,00 a R\$ 3000,00/kg, no Amazonas, entre R\$ 1.300,00 a R\$ 2.500,00/kg. Em Mato Grosso, os preços oscilam entre R\$ 1.800,00 a R\$ 2.600,00/kg. No Pará, entre R\$ 1.200,00 a R\$ 3.000,00/kg, e em Rondônia, o preço do mercúrio foi um dos menores registrados, entre R\$ 1.500,00 e R\$ 1.800,00/kg.

Foram obtidas informações sobre a procedência do mercúrio utilizado nas operações. Os proprietários relataram diferentes formas de aquisição, incluindo a compra por revendedores nas cidades, entrega direta no garimpo por intermediários, aquisição em cooperativas locais e o recebimento do mercúrio direto no local de trabalho. Além desses canais, a equipe de campo observou trocas e negociações informais entre garimpeiros, realizadas em diferentes localidades.

As informações levantadas indicam que parte do mercúrio provém de países vizinhos do Brasil, tais como França (Guiana Francesa, Guiana, Venezuela, Colômbia, Peru, Bolívia e Paraguai). A entrada no território brasileiro ocorre por meio de rotas terrestre e fluviais que passam por áreas de fronteira de difícil fiscalização. Destacam-se, entre essas rotas, o eixo do Rio Solimões, que permite o acesso a diversas regiões garimpeiras da Amazonia Legal e os corredores terrestres conectando Bolívia e Paraguai ao Centro-Oeste. A análise completa sobre esse tema está apresentada no Volume II – Diagnóstico da matriz normativa e das políticas públicas do Projeto Ouro sem Mercúrio.

### **5.3. DADOS DE POPULAÇÃO GARIMPEIRA E GRAU DE INFORMALIDADE**

As observações de campo evidenciaram a heterogeneidade de funções existentes no garimpo. É comum que um mesmo trabalhador exerça múltiplas atividades, atuando como garimpeiro, ajudante de garimpo, operador de máquinas pesadas, operador de draga, dono de garimpo, requeiro, cozinheira(o) ou supervisor do garimpo. Considerando essa diversidade de papéis e funções, que caracteriza grande parte das operações em termos de escala, tecnologia e contexto socioeconômico-cultural, o projeto buscou estimar a população diretamente envolvida nas atividades garimpeiras nas áreas estudadas.

Com base nas análises apresentadas no Volume II do Projeto Ouro sem Mercúrio, estima-se que aproximadamente 200.000 garimpeiros de ouro estejam envolvidos diretamente em atividade razoavelmente contínua, ou seja, que ao menos em um período dentro do ano se dediquem à atividade. Ainda segundo esse volume, é possível estimar que o grau de informalidade das vendas da produção de ouro de, tenha sido, no mínimo, 48% para o ano de 2023.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados das análises consolidadas dos balanços metalúrgicos de mercúrio conduzidas entre os meses de maio e novembro de 2023.

### 6.1. ANÁLISE DOS BALANÇOS METALÚRGICOS DE MERCÚRIO

Foram considerados 32 balanços metalúrgicos de mercúrio realizados em operações da MAPE de ouro nos estados do Amapá, Amazonas, Mato Grosso e Pará (Tabela 7). Os resultados dos experimentos estão apresentados nos **Apêndices A e B**.

**Tabela 7. Distribuição dos balanços de mercúrio para o inventário**

Estado	Queima do amálgama com uso de retortas	Queima do amálgama sem o uso de retortas	Total de balanços de mercúrio por estado
Amapá	4	3	7
Amazonas	3	-	3
Mato Grosso	14	-	14
Pará	5	4	9
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>7</b>	<b>32</b>

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Do total, 25 balanços foram realizados em operações com uso de retortas na queima do amálgama e 7 balanços foram conduzidos em operações sem o uso de retortas. Em todos os casos, o material processado era explotado de depósitos secundários, com a amalgamação de concentrados. Os balanços com uso de retortas, são 4 operações de garimpo de baixão (colúvio) no Amapá e 3 no Amazonas ocorreram em balsas em leito de rio (aluvião). O Mato Grosso concentrou o maior número de registros, com 14 balanços metalúrgicos, todos realizados em operações de garimpo de bancadas e de baixão (colúvio/elúvio). No Pará, os 4 balanços referem-se a dragas fluviais e garimpos de baixão.

Os balanços sem o uso de retortas foram registrados em 3 garimpos de baixão no Amapá e 4 no Pará. Em todos os casos, o material processado também era proveniente de depósitos secundários, com amalgamação de concentrados.

Nas 25 operações mapeadas em que foi constatado o uso de retortas, a média de recuperação de mercúrio filtração e condensação na retorta foi de cerca de 75%. Nessas operações, a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  foi de 0,18 e nas 7 operações mapeadas sem o uso de retortas de 0,63 (Tabela 8).

**Tabela 8. Recuperação de mercúrio e a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$**

Tipo de queima do amálgama	Mercúrio recuperado	Razão $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$
Com uso de retortas	98%	0,18
Sem uso de retortas	40%	0,63

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Para a avaliação inicial deste inventário, é importante pontuar que todas as operações visitadas faziam uso de mercúrio nas práticas de processamento do minério explotado. Durante as campanhas de campo, foram identificadas duas principais formas de aplicação da amalgamação, sendo a amalgamação de concentrados e amalgamação de todo o minério em placas de cobre. Ambas as técnicas envolvem o uso de mercúrio metálico, porém diferem quanto à quantidade de Hg empregada, à eficiência dos processos, e ao potencial impacto ambiental referente às emissões e liberações de mercúrio. A amalgamação de concentrados, mais comum nas áreas visitadas pela equipe de campo, consiste na adição de mercúrio ao material concentrado nas calhas concentradoras.

A amalgamação de todo o minério foi observada em uma única localidade com minério primário. Nessas operações, o material é britado, moído em moinhos de martelos com fluxo de água, e, em seguida, conduzido sobre placas de cobre recobertas com mercúrio para formação do amálgama. Devido à maior densidade do ouro, esse processo permite a sua retenção nas placas.

No entanto, a amalgamação de todo o minério apresenta baixa eficiência e recupera menos de 30% do ouro presente e aumenta as perdas de mercúrio nos rejeitos (UNEP, 2012; YOSHIMURA; SUEMASU; VEIGA, 2021). Conforme os critérios descritos no item de validação dos dados, foram considerados válidos, para fins de cálculos das emissões e liberações de mercúrio deste inventário, apenas os resultados provenientes de operações que utilizavam a técnica de amalgamação de concentrados com uso e sem uso de retortas.

Os dados coletados indicam que não há um padrão único para a escolha do local onde a amalgamação é realizada, que depende das condições operacionais do tipo de operação, da experiência local e da infraestrutura disponível. Nas operações em balsas e dragas é comum que a amalgamação ocorra a bordo. Também é frequente que, em operações de balsas, a amalgamação seja feita nas margens do rio. No que se refere aos rejeitos amalgamados, observou-se que nas balsas o material remanescente da amalgamação é jogado novamente para o início da calha concentradora. Nas dragas, os rejeitos amalgamados são processados no segundo andar, e a parte que é carregada pela água retorna para a calha concentradora para nova tentativa de processamento.

Em garimpos de baixão, foram observadas diferentes soluções para conter contaminantes dos rejeitos amalgamados, incluindo tanques de cimento e piscinas de fibra. Embora em alguns casos essas estruturas fossem improvisadas, em outras localidades apresentavam bom nível de contenção. De todo modo, ajudam a conter a infiltração de contaminantes no solo e na água.

Para efeito de cálculo neste inventário, considerou-se que os *dorés* obtidos ao final do processo de amalgamação possuem 100% de teor de ouro, desconsiderando-se a presença de prata e outros metais associados. Essa simplificação é justificada com base em informações fornecidas por compradores de ouro em regiões da MAPE de ouro, os quais relatam que, após a fundição e remoção de aproximadamente 2% de mercúrio residual, os dorés apresentam, pureza superior a 96%, podendo alcançar teores acima de 98% de ouro. Assim, a adoção do valor de 100% visa padronizar os cálculos de forma conservadora.

## 6.2. AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES E LIBERAÇÕES DE MERCÚRIO NA QUEIMA DOS AMÁLGAMAS COM O USO DE RETORTAS

Nesta seção, apresenta-se a avaliação das emissões e liberações de mercúrio da queima dos amálgamas com o uso de retortas, com base nos 25 balanços de massa de mercúrio realizados em campo (**Apêndice A**). A massa total de doré obtida nas operações avaliadas foi de aproximadamente 3 kg. A massa média de doré por operação foi de  $119,59 \pm 365,5$  g (considerando 2 x desvio padrão para representar 95% das ocorrências). A alta dispersão observada nos dados reflete as diferentes realidades operacionais dos garimpos de ouro avaliados.

O maior valor registrado de doré (949,50 g) foi obtido em uma operação de maior escala, localizada na Baixada Cuiabana, Mato Grosso, caracterizada pelo processamento de cerca de 1.000 toneladas de minério coluvionar por dia (24 horas de operação), com produção mensal estimada entre 10 e 15 kg de doré. Esta operação se distingue pelo maior grau de mecanização e pela capacidade produtiva superior em comparação com garimpos de baixão. Diferentemente das operações de baixão em Peixoto de Azevedo, Mato Grosso e nas operações do Pará, que utilizam calhas concentradoras para recuperação do ouro, a operação da Baixada Cuiabana utiliza concentrador centrífugo fabricado localmente como principal método de beneficiamento. Os menores valores de doré (14,00 g, 14,60 g e 17,70 g) foram obtidos em amostragens realizadas em operações de balsas em leito de rio no estado do Amazonas. Geralmente, essas operações são conduzidas em balsas com estrutura rudimentar de madeira e apresentam baixa produtividade.

Os principais parâmetros obtidos nas amostragens de campo foram compilados na Tabela 9. As médias apresentadas foram calculadas pelas médias das gramas de mercúrio (em gramas) registradas para cada componente dos balanços realizados nas operações amostradas. Para estimar o desvio padrão da razão (porcentagens) derivadas dessas médias, foi necessária a aplicação de uma correção de propagação de incertezas, considerando que os parâmetros derivam de médias de grandezas distintas. O desvio padrão das razões (porcentagens) apresentadas na Tabela 5 foi calculado utilizando a seguinte equação, conforme metodologia descrita por Ortiz et al., (2009):



$$\sigma_R \approx \sqrt{\frac{s_K^2}{n_K \bar{N}^2} + \frac{\bar{K}^2 s_N^2}{n_N \bar{N}^4}}$$

Onde:

- $K$  = média da primeira grandeza
- $S_K$  = desvio padrão amostral da primeira grandeza
- $n_K$  = número de observações válidas para a primeira grandeza
- $N$  = média da segunda grandeza
- $S_N$  = desvio padrão amostral da segunda grandeza
- $n_N$  = número de observações válidas para a segunda grandeza

**Tabela 9. Principais parâmetros obtidos as operações com retortas**

Parâmetros	Média %	Desvio Padrão %	2 x Desvio Padrão %
Mercúrio no amálgama	34,4%	20,3%	40,6%
Mercúrio total recuperado	98,0%	34,9%	69,8%
Perda total de mercúrio	2,0%	0,88%	1,76%
<b>Razão Hg<sub>perdido</sub>:Au<sub>produzido</sub>*</b>	0,177	0,133	0,266

Nota: 2 x o desvio padrão denota que 95% das observações estão dentro desta faixa de variação.

\*Dados com 3 algarismos significativos.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

A eficiência das retortas na recuperação de mercúrio por condensação foi estimada com base em 15 das 25 operações mapeadas. O cálculo considerou a proporção entre a massa total de mercúrio condensado na retorta em gramas e a massa total de mercúrio contido no amálgama (g). Os resultados de campo indicaram uma eficiência média de recuperação de mercúrio pelas retortas de cerca de 76%, em relação ao mercúrio contido no amálgama, com uma variação entre 51% e 99%. As operações de retortagem que não atingiram eficiências superiores a 90% foram resultados da inexperiência do operador, uso de retortas sem manutenção e pouco tempo de retortagem (algumas apenas 10 a 15 minutos), em vez de 45 a 50 minutos utilizados pelas operações mais eficientes.

A média de recuperação obtida no presente estudo (76%) está próximo ao valor médio reportado por Castilhos e Domingos (2018), que calcularam uma eficiência média de 80% para retortas avaliadas em garimpos no Brasil. Ademais, em ensaios laboratoriais controlados com equipamentos semelhantes, obtiveram uma eficiência próxima de 80% (SOUZA; CASTILHOS, 2016). Mesmo com retorta, observou-se perda de mercúrio na retortagem, atribuídas, provavelmente, por escape pelo sistema de vedação da retorta ou por retenção de mercúrio no equipamento. Além disso, a eficiência da retortagem de algumas operações resultou em uma média de 5,5% de mercúrio ainda no doré após retortagem, confirmando os dados reportados por Veiga e Hinton (2002) em operações em Poconé, Mato Grosso.

Das 25 operações visitadas nas quais foi constatado o uso de retortas, em 15 foi possível obter dados para o cálculo da massa de mercúrio contido no amálgama. Esse valor foi estimado pela diferença entre a massa do amálgama antes da queima e a massa do ouro doré obtida decomposição térmica. A média percentual de mercúrio na massa do amálgama foi de  $34,4 \pm 40,6\%$  (2 x desvio padrão), que se manteve entre a faixa normal de 30-40% observada em várias outras operações de amalgamação em diferentes países (VEIGA; GUNSON, 2020). A Coleta 8 (garimpo de bancada), chamou atenção pela massa de 1495,50 g de amálgama, com 546 g de mercúrio, ou seja 37% de Hg no amálgama, valor próximo da média. No entanto, foi adicionado um volume excessivo de mercúrio ao processo, superior a 4 kg.

Após a avaliação da composição do amálgama, foi analisada a eficiência do processo de filtração do excesso de mercúrio realizado antes da decomposição térmica (pirólise). Os dados demonstraram uma recuperação média de  $90,0 \pm 64,3\%$  (2 x desvio padrão). Estudos anteriores apontam que a recuperação de mercúrio por filtração normalmente varia na ordem de 50 e 60% (CORDY et al., 2011; GARCIA et al., 2025). Entretanto, nas operações avaliadas neste inventário, observou-se que a alta taxa de recuperação na filtração está condicionada ao uso excessivo de mercúrio em relação à quantidade de ouro produzido, e por isso grande parte do mercúrio alimentado é recuperado na filtração. Das 25 operações avaliadas, 15 apresentaram recuperação superior a 80% do mercúrio na filtração, ou seja, grande parte do mercúrio não se ligou ao ouro durante a amalgamação. Ainda assim, observou-se uma perda de mercúrio para os rejeitos de  $1,59 \pm 1,67\%$  em relação ao mercúrio alimentado.

Esses resultados reforçam a necessidade de dialogar com os donos de garimpos, operadores e lideranças de cooperativas de garimpeiros sobre a redução do uso excessivo de mercúrio, visto que, apesar de ter uma boa recuperação, uma fração continua sendo liberada no ambiente. Cabe destacar que, que em vários casos o processo de amalgamação é feito em uma central de amalgamação do próprio garimpo com tanques de contenção ou piscinas de fibra ou cimento, que evitam o contato do mercúrio com o solo. As perdas nos rejeitos refletem que a separação por bateamento do amálgama com excesso de mercúrio dos minerais pesados dos concentrados é ineficiente. Os rejeitos ainda contêm teores de ouro não liberado dos minerais pesados e o mercúrio perdido com os rejeitos é aquele de maior impacto ambiental quando este material é cianetados, pois forma  $\text{Hg}(\text{CN})_2$  (aq) em solução que é mais tóxico que o cianeto de sódio e o mercúrio metálico (SILVA et al., 2023).

A perda média total de mercúrio nas 25 operações de amalgamação avaliadas representou aproximadamente 2% do mercúrio alimentado no processo. A recuperação média de 98% demonstra que, quando bem aplicadas, as retortas podem reduzir significativamente a exposição ocupacional e a contaminação ambiental. Considerando as massas de mercúrio recuperadas nas etapas de filtração e condensação, a razão  $\text{Hg}_{\text{perdido}}:\text{Au}_{\text{produzido}}$  calculada para 15 das 25 operações foi de **0,177 ± 0,266**. Esta razão deveria se aproximar de 0,1, valor esperado para amalgamação com retortas. A diferença observada, reflete, a perda de mercúrio para os rejeitos de amalgamação, a ineficiência de algumas retortas e o excesso de mercúrio adicionado aos processos.

### **6.3. AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES E LIBERAÇÕES DE MERCÚRIO NA QUEIMA DOS AMÁLGAMAS SEM RETORTAS**

Nesta seção, é apresentada a avaliação das emissões e liberações de mercúrio da queima dos amálgamas sem o uso de retortas, a partir de 7 balanços de massa de mercúrio realizados em campo. Nesses casos, a queima do amálgama é feita a céu aberto (**Apêndice B**). Durante as observações de campo, constatou-se que essas queimas ocorriam em áreas de mata fechada ou próximas aos alojamentos dos operadores. Nesses locais, percebeu-se que a prática de queima a céu aberto é mantida por hábito e existe resistência às mudanças.

Em algumas operações visitadas no Pará, embora os proprietários tenham adquirido retortas para os operadores utilizarem ou até mesmo operassem eles próprios os equipamentos, na primeira necessidade de manutenção ou quebra de alguma parte, a retorta é abandonada, e eles retornam a queima a céu aberto. Em alguns isolados casos, alguns garimpeiros comentaram que acreditam que a queima sem retorta é mais rápida e eficiente. Este péssimo costume, expõe os trabalhadores e comunidades vizinhas a inalação de vapores tóxicos e ainda emite mercúrio para outras partes do ambiente.

A quantidade total de mercúrio alimentado aos concentrados, considerando os 7 balanços de massa realizados, foi de 494 g, com valores variando entre um mínimo de 11 g e um máximo de 211 g. O valor médio de alimentação de mercúrio foi de  $70,6 \pm 135$  g. Os dados analisados demonstram que a produção média de ouro doré nas operações que não utilizam retortas foi de  $110,8 \pm 345$  g. A análise aponta, com metade das operações produzindo abaixo de 39,20 g de *doré* (mediana). Essa discrepância fica evidente pelo alto desvio padrão. O maior valor registrado refere-se a Coleta 5 com 494,5 g de um garimpo de baixão, localizado no Pará. Os principais parâmetros obtidos nas amostragens de campo foram compilados na Tabela 10.

**Tabela 10. Principais parâmetros obtidos as operações sem retortas**

Parâmetros	Média %	Desvio Padrão %	2 x Desvio Padrão %
Mercúrio no amálgama	20,9%	15,4%	30,8%
Mercúrio total recuperado	40,0%	18,1%	36,1%
Perda total de mercúrio	60,0%	36,1%	72,2%
<b>Razão Hg<sub>perdido</sub>:Au<sub>produzido</sub>*</b>	0,628	0,418	0,836

Nota: 2 x o desvio padrão denota que 95% das observações estão dentro desta faixa de variação.

\*Dados com 3 algarismos significativos.

Fonte: Elaborado pelos Autores.

O mercúrio perdido por evaporação durante o processo de queima do amálgama representou, em média,  $41,5 \pm 25,0\%$  do mercúrio alimentado nas operações avaliadas. Este resultado é compatível com o estudo de Cordy et al. (2011), que relataram perdas de 50% de mercúrio por evaporação em 15 queima de amálgamas em Antioquia, na Colômbia. A análise dos amálgamas gerados indicou uma média de  $20,9 \pm 30,8\%$  de mercúrio. Isso indica que os operadores aplicaram maior pressão na filtração do amálgama antes da queima.

A filtração manual foi o único processo de recuperação e reciclagem do mercúrio adicionado nas operações sem retortas, com recuperação média de  $40,0 \pm 36,1\%$  do mercúrio alimentado. O mercúrio perdido nos rejeitos foi de  $18,5 \pm 23,0\%$  e a perda por evaporação teve como média  $41,5 \pm 50,0\%$  do mercúrio alimentado. Observa-se, assim, um contraste entre as operações sem retortas que tiveram em média uma perda total de  $60,0 \pm 72,2\%$  do mercúrio alimentado, e aquelas com uso de retortas, nas quais a perda média foi de apenas 2% do mercúrio alimentado. O uso de retortas não apenas protege os operadores e vizinhos, mas também traz o benefício de se poder reciclar o mercúrio utilizado.

A razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  nas operações sem retortas foi de  $0,63 \pm 0,84$ , aproximadamente quatro vezes superior à observado nas operações com retortas (0,18). Esse valor se aproxima das médias internacionalmente reconhecidas, em torno de 1, para operações que não utilizam retortas durante a decomposição térmica do amálgama (VEIGA; BAKER, 2004; UNEP, 2012). No entanto, a elevada taxa de recuperação por filtração contribuiu para a redução da razão observada neste estudo.

#### 6.4. ESTIMATIVAS DOS FATORES-PADRÃO DE EMISSÃO E LIBERAÇÃO

As principais liberações de mercúrio na MAPE de ouro ocorrem ao longo do ciclo de processamento do minério. Os meios receptores mais afetados são o ar, solos, águas fluviais e sedimentos fluviais. Esses meios podem, ou não, atuar como poluidores, dependendo das condições que favoreçam a oxidação e complexação do mercúrio. Nessas condições, o mercúrio metálico pode ser transformado em metilmercúrio e facilmente bioacumulado. O Toolkit adota fatores-padrão de emissão (entrada) de mercúrio para o meio ambiente para a produção de ouro (ver Tabela 11 e Apêndice C).

Quando o mercúrio é utilizado na amalgamação de todo o minério e sem retortas, a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  adotada pelo Toolkit é 5:1. Se o mercúrio é usado para amalgamação de todo o minério com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio a razão é 4.25:1. Se forem usados concentrados sem uso de retortas, a razão é de 1.3:1. Para amalgamação de concentrados com uso de retortas, a quantidade de mercúrio utilizada é menor, cerca de 0.55:1.

Para fins de estimativas, o Toolkit também estabelece fatores de distribuição de saída de mercúrio, que representam a fração do mercúrio perdido em diferentes meios receptores ambientais (ar, água e solo) em cada tipo de categoria de fonte (Tabela 12). Nas diretrizes do Toolkit para elaboração de inventários nacionais, recomenda-se a aplicação desses fatores-padrão de entrada e de distribuição de saída de mercúrio sempre que dados específicos locais não estejam disponíveis. Quando existem informações obtidas em campo, esses fatores podem ser ajustados às condições reais de operação (PNUMA, 2015).

**Tabela 11. Fatores-padrão de entrada de mercúrio do Toolkit PNUMA**

<b>Categoria de fonte</b>	<b>Fator de entrada Padrão Kg de Hg/t de Hg produzido</b>	<b>Descrição da categoria de fonte</b>
<b>Minério inteiro sem uso de retortas</b>	5,00	Extração do minério inteiro (sem uso de retorta)
<b>Minério inteiro com uso de retortas</b>	4,25	Extração do minério inteiro e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio
<b>Minério concentrado sem uso de retortas</b>	1,30	Extração a partir de concentrado (sem uso de retorta)
<b>Concentrado com uso de retortas</b>	0,55	Extração a partir de concentrado e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio

Fonte: Toolkit do Inventário Nível 2 do PNUMA, elaborado pelos Autores.

**Tabela 12. Fatores-padrão de distribuição de mercúrio do Toolkit PNUMA**

Categoria de fonte	Fator de saída Padrão Kg de Hg/t de Hg produzido			Descrição da categoria de fonte
	Ar	Água	Terra	
<b>Minério inteiro sem uso de retortas</b>	0,20	0,40	0,40	Extração do minério inteiro (sem uso de retorta)
<b>Minério inteiro com uso de retortas</b>	0,06	0,47	0,47	Extração do minério inteiro e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio
<b>Minério concentrado sem uso de retortas</b>	0,77	0,12	0,11	Extração a partir de concentrado (sem uso de retorta)
<b>Concentrado com uso de retortas</b>	0,45	0,28	0,27	Extração a partir de concentrado e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio

Fonte: Toolkit do Inventário Nível 2 do PNUMA, elaborado pelos Autores.

No âmbito deste Inventário, foi possível estimar os valores ajustados a partir dos balanços de metalúrgicos realizados nas 35 operações visitadas. As estimativas foram calculadas conforme os dois tipos de amalgamação observados em campo: 1) amalgamação de concentrados com uso de retortas e 2) amalgamação de concentrados sem uso de retortas. Os resultados apontaram que a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  na amostragem de concentrado com e sem o uso de retortas foi de 0,18, e de 0,63, respectivamente, ambas situações com exploração de minério secundário (Tabela 13).

Assim, para fins de cálculo do inventário, foram adotados valores de referência da literatura. A operação de amalgamação de todo minério ocorre minoritariamente no Brasil para captura de ouro de minérios primários. Raramente se usa esse processo para minérios secundários de baixos teores de ouro. Com base nos dados obtidos, foi possível estimar os fatores de distribuição de saída do mercúrio por tipo de categoria de fonte (amalgamação), considerando as frações de mercúrio que se perderam para o ar e para os receptores terrestres e hídricos (solo, água, sedimentos e rejeitos, com ou sem contenção).

**Tabela 13. Fatores-padrão de entrada de mercúrio obtidos no projeto**

<b>Categoria de fonte</b>	<b>Tookit PNUMA</b>	<b>Dados de campo obtidos no Projeto</b>	<b>Descrição da categoria de fonte</b>
<b>Minério inteiro sem uso de retortas</b>	5,00	3,00*	Extração do minério inteiro (sem uso de retorta)
<b>Minério inteiro com uso de retortas</b>	4,25	2,00*	Extração do minério inteiro e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio
<b>Minério concentrado sem uso de retortas</b>	1,30	0,63	Extração a partir de concentrado (sem uso de retorta)
<b>Concentrado com uso de retortas</b>	0,55	0,18	Extração a partir de concentrado e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio

\* Fatores consolidados na literatura técnica.  
Fonte: Elaborado pelos Autores.

A distribuição de saída é ilustrada na Tabela 14. A fração atmosférica (ar) foi calculada a partir da proporção entre a massa de mercúrio evaporada ou escapada da retorta durante a queima do amálgama em gramas e a massa total de mercúrio perdida no processo. A fração estimada para o solo/água foi estimada pela divisão da massa de mercúrio perdida nos rejeitos pela massa total de mercúrio perdida.

Para as operações com amalgamação de todo o minério sem uso de retortas, estimou-se em cerca de 51% do mercúrio foi emitido para a atmosfera e 49% foi liberado para os solos, águas, sedimentos e rejeitos, com ou sem sistemas de contenção. Nas operações com amalgamação de concentrados sem uso de retorta, a fração atmosférica foi de 69% e 31% do mercúrio liberado para solo/água. Já nas operações com uso de retortas na amalgamação de concentrados a massa de mercúrio perdida para o ar foi de 20% e 80% foi despejada no solo/água. Para o caso da amalgamação de todo o minério com uso de retortas, não foi possível estimar a distribuição de saída devido à ausência de dados de campo para essa categoria de fonte no presente estudo.



**Tabela 14. Fatores-padrão de distribuição de mercúrio obtidos no projeto**

Fator de saída Padrão Kg de Hg/t de Hg produzido			
Categoria de fonte	Ar	Solo/Água	Descrição da categoria de fonte
<b>Minério inteiro sem uso de retortas</b>	0,51	0,49	Extração do minério inteiro (sem uso de retorta)
<b>Minério inteiro com uso de retortas</b>	-	-	Extração do minério inteiro e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio
<b>Minério concentrado sem uso de retortas</b>	0,69	0,31	Extração a partir de concentrado (sem uso de retorta)
<b>Concentrado com uso de retortas</b>	0,20	0,80	Extração a partir de concentrado e com o uso de retortas e reciclagem do mercúrio

Fonte: Elaborado pelos Autores.

## 6.5. ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES E LIBERAÇÕES DE MERCÚRIO

Nesta seção, são apresentadas as estimativas nacionais de emissões e liberações de mercúrio da MAPE de ouro no Brasil, com base na metodologia do Toolkit do Inventário Nível 2 do PNUMA. As estimativas foram elaboradas a partir dos 32 balanços de mercúrio realizados, integrando os resultados com a triangulação de informações secundárias sobre produção de ouro e cenários de clandestinidade no país. Essa abordagem permitiu a mensuração de fatores-padrão ajustados às condições observadas nos diferentes tipos de amalgamação, possibilitando a extrapolação dos dados para o nível nacional.

Para a estimativa das emissões e liberações, utilizou-se como base a produção média de ouro no Brasil de origem garimpeira entre os anos de 2020 e 2022, correspondente a 28,63 toneladas (Tabela 6). Essa produção foi distribuída proporcionalmente entre os diferentes tipos de amalgamação observados em campo, conforme a participação estimada de cada método na produção total.

As estimativas apresentadas consideraram os níveis de clandestinidade da produção aurífera da MAPE de ouro, conforme analisado no Volume II deste Panorama Nacional. Para entender os as incertezas, foram adotados três cenários:

- **Cenário Mínimo (C = 0%):** cálculo utilizando somente a comercialização formal de ouro. Representa uma estimativa conservadora e o limite inferior teórico, ao considerar qualquer contribuição do mercado clandestino.
- **Cenário Provável (C= 25%):** considera que cerca de 25% da produção da MAPE ocorre clandestinamente. Significa respectivamente que 1 em cada 4 kg de ouro seria comercializado de forma ilegal.
- **Cenário Máximo (C= 33%):** considera que cerca de 33% da produção da MAPE de ouro ocorre clandestinamente. Significa respectivamente que 1 em cada 3 kg de ouro seria comercializado de forma ilegal.

### 6.5.1. Estimativa de perda total de mercúrio

Esta seção apresenta a estimativa das emissões e liberações combinada de mercúrio da MAPE de ouro no Brasil. A metodologia de cálculo baseou-se na produção média de ouro atribuída à MAPE de ouro entre os anos de 2020 e 2022 e os fatores-padrões  $Hg_{perdido}:Au_{produzido}$  obtidos para cada tipo de amalgamação no projeto. A perda total foi ajustada conforme três cenários de contribuição da produção clandestina (C= 0%, 25% e 33%). Essa triangulação de informações permitiu gerar uma faixa estimada de emissões e liberações totais de mercúrio.

A média de produção de ouro da MAPE de ouro foi distribuída proporcionalmente entre os métodos de amalgamação identificados nos trabalhos de campo. Foram considerados os seguintes percentuais de contribuição para a produção aurífera:

- 1% para amalgamação de todo o minério sem retorta
- 25% para amalgamação de concentrados sem uso de retortas
- 74% para amalgamação de concentrados com uso de retortas

Não foram identificadas operações com amalgamação de todo o minério com uso de retortas nas visitas de campo, por isso esse valor não foi considerado. A distribuição percentual aqui adotada foi estimada com base em evidências de campo, levando em conta a frequência relativa de cada método e sua contribuição estimada à produção total. A ponderação dos fatores  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  calculados pelo Projeto, permitiu compor um fator único ponderado, adequado para subsidiar as estimativas nacionais de emissões e liberações de mercúrio, com base em volumes de ouro produzido que reflitam com maior precisão as condições reais observadas.

A Tabela 15 apresenta os dados utilizados para estimar as emissões e liberações prováveis de mercúrio no país, considerando diferentes cenários. A partir da média de produção de ouro dos anos de 2020-2022, os valores estimados variam entre 9,15 t/a (cenário mínimo), 11,44 t/a (cenário provável) e 12,17 t/a (cenário máximo). Para o cenário provável, o fator ponderado foi de 0,401 ( $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$ ).

**Tabela 15. Estimativa de perda total de mercúrio**

Tipo de Amalgamação	Peso na produção de ouro %	Produção de ouro (t/a)	Hg: Au*	Emissão e Liberação Combinadas de Hg (t/a)		
				Mínimo C=0%	Provável C=25%	Máximo C=33%
Todo minério sem retorta	1	0,29	3,00	0,86	1,07	1,14
Todo minério com retorta	-	-	2,00	-	-	-
De concentrado e sem o uso de retortas	25	7,13	0,63	4,49	5,62	5,98
De concentrado e com o uso de retortas	74	21,11	0,18	3,80	4,75	5,05
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>28,54</b>		<b>9,15</b>	<b>11,44</b>	<b>12,17</b>
<b>Fator ponderado Hg: Au</b>				<b>0,321</b>	<b>0,401</b>	<b>0,427</b>

\*Razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$   
Fonte: Elaborado pelos Autores.

### **Cenário Mínimo (C= 0%)**

Foi considerado como cenário mínimo em que toda a produção de ouro ocorreu 100% dentro da legalidade, com a produção garimpeira declarada de ouro de 28,53 t/a baseada na média entre os anos de 2020 e 2022 (Tabela 6). A perda total estimada de mercúrio é de 9,15 t/a, com um fator ponderado de emissão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  de 0,321. Cerca de 50% do total (4,49 t/a) da perda de mercúrio é atribuída a amalgamação de concentrados sem o uso de retortas, cuja contribuição à produção nacional foi estimada em aproximadamente 25%, com base na frequência e produtividade relativas observadas durante os trabalhos de campo. A amalgamação com uso de retortas, representa 74% da produção, e contribui com 3,80 t/a (41%), mesmo apresentando uma razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  de 0,18. A amalgamação de todo o minério sem retorta, representa 1% da produção (285 t/a), gera perdas de mercúrio de 0,86 t/a (9%).

### **Cenário Provável (C= 25%)**

Este cenário apresenta a estimativa de que 25% da produção de ouro ocorre de maneira clandestina. A perda total de mercúrio sobe para 11,44 t/a, e o fator ponderado de emissão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  é de 0,401. Nesse cenário, a amalgamação de concentrados sem retortas é a principal fonte de perdas com 5,62 t/a, representando 50% do total. A amalgamação com retortas fica com 4,75 t/a e 41% e, por fim, pela amalgamação de todo o minério sem retorta com 1,07 t/a, 9%. Assim, é razoável estimar que esse cenário representa mais realista a situação do Brasil em termos de perdas de mercúrio.

### **Cenário Máximo (C= 33%)**

Este cenário apresenta a estimativa de que 33% da produção de ouro ocorre de maneira clandestina. A perda total de mercúrio é de 12,17 t/a, e o fator ponderado  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  de 0,427. A amalgamação de concentrado sem retorta é responsável por 5,98 t/a (50%) da perda total, a amalgamação com retorta contribui com 5,05 t/a (41%) e a amalgamação de todo o minério sem retorta tem impacto elevado em termos relativos com 1,14 t/a (9%).

### 6.5.2. Distribuição das emissões e liberações de mercúrio por meio receptor

As perdas de mercúrio por meio receptor foram realizadas com base na distribuição das perdas entre emissões atmosféricas (ar) e liberações para solo, água, sedimentos e rejeitos, com ou sem contenção. Entre os fatores que influenciam as emissões diretamente para a atmosfera de mercúrio são a quantidade de Hg presente no amálgama, a produção de ouro e a aplicação de sistemas para condensação dos vapores de mercúrio (retortas, capelas, etc), conforme citado por Castilhos e Domingos (2018). Os principais fatores que influenciam as liberações (perdas para solos, águas e/ou rejeitos) são: a quantidade de mercúrio usado no processo, a quantidade de ouro produzida, o tipo de garimpo e a existência de sistemas de controles de resíduos e rejeitos (ex: piscinas para realizar amalgamação).

Para estimar a distribuição das perdas totais de mercúrio da MAPE de ouro entre os meios receptores (ar e solo/água), foi aplicada a proporção dos fatores de emissão e liberação obtidos em campo para cada tipo de amalgamação. As categorias analisadas encontram-se nas Tabelas 14 e 15. Para as emissões atmosféricas (ar), o total de mercúrio perdido foi multiplicado pelo fator de emissão correspondente a cada tipo de amalgamação. Para as liberações (solo/água), o mesmo total foi multiplicado pelo fator de liberação referente a categoria.

A aplicação desses fatores resultou na estimativa final das emissões e liberações, expressas em toneladas por ano para cada cenário de clandestinidade (mínimo, provável e máximo). Os resultados consolidados são apresentados na Tabela 16, a seguir. Desta forma, foi possível estimar as emissões e liberações prováveis e máximas de mercúrio decorrentes das práticas da MAPE de ouro no Brasil. No cenário provável (C=25%), as emissões atmosféricas totalizaram aproximadamente 5,37 t/a por ano e as liberações para o solo e água foram estimadas em 6,07 t/a.

No cenário máximo (C= 33%), as perdas aumentam para 5,72 t/a para o ar e 6,45 t/a liberadas para solo, água, sedimentos e rejeitos, com ou sem contenção. O fator ponderado  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  manteve-se igual nos dois cenários, com valores de 0,470 para emissões atmosféricas e 0,530 para liberações para o solo/água.



Tabela 16. Estimativas de distribuição das perdas por meio receptor

Tipo de Amalgamação	Emissão e Liberação Combinadas de Hg (ton.)					
	Mínimo C=0%		Provável C=25%		Máximo C=33%	
	Emissões Hg, t/a	Liberações Hg, t/a	Emissões Hg, t/a	Liberações Hg, t/a	Emissões Hg, t/a	Liberações Hg, t/a
Todo minério sem retorta	0,44	0,42	0,55	0,52	0,58	0,56
Todo minério com retorta	-	-	-	-	-	-
De concentrado e sem o uso de retortas	3,10	1,39	3,88	1,74	4,12	1,85
De concentrado e com o uso de retortas	0,76	3,04	0,95	3,80	1,01	4,04
<b>Total</b>	<b>4,30</b>	<b>4,85</b>	<b>5,37</b>	<b>6,07</b>	<b>5,72</b>	<b>6,45</b>
<b>Fator ponderado Hg:Au</b>	<b>0,470</b>	<b>0,530</b>	<b>0,470</b>	<b>0,530</b>	<b>0,470</b>	<b>0,530</b>

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Os dados obtidos neste inventário indicam que a distribuição das emissões atmosféricas e liberações para o ar, solo/água na MAPE de ouro apresenta relativa estabilidade entre os diferentes cenários, com proporções próximas a 50% para cada meio receptor, independentemente do grau de formalização das operações. Contudo, a informalidade representa um fator crítico, uma vez que está associada à ausência de práticas seguras de recuperação e contenção de mercúrio, à falta de equipamentos adequados e à deficiência de capacitação técnica.

Essa combinação resulta em maiores perdas totais de mercúrio para todos os meios receptores como evidenciado nos balanços de massa realizados em campo. Vale destacar que foram identificadas situações em que, mesmo com acesso a tecnologias como retortas, as operações apresentavam perdas de mercúrio devido à má utilização dos equipamentos e à falta de manutenção, o que eleva os riscos de exposição ocupacional e ambiental.

## 6.6. CÁLCULO DO MERCÚRIO PERDIDO PELOS DADOS DE CAMPO

Com base nos dados de campo obtidos em campo, a partir de 32 operações amostradas, foi realizada uma simulação para estimar a perda total de mercúrio em diferentes cenários de adoção de retortas na MAPE de ouro no Brasil. A simulação considerou a média de produção de ouro dos anos 2020 a 2022, estimada em 28,5 t/a. Foram utilizadas as razões  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  de 0,18 para as operações utilizando retortas e 0,63 para aquelas que queimam mercúrio sem o uso de retortas. A análise consistiu na variação progressiva da proporção de garimpos que utilizam retortas, de 100% até 0%, para observar o impacto na perda total anual de mercúrio.

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos para cada cenário, destacando como a redução no uso de retortas está associada ao aumento da razão das perdas de mercúrio para o ambiente. As perdas totais de mercúrio estimadas variam de 5,13 t/a - 17,96 t/a, dependendo do grau de adoção de retortas nas operações da MAPE de ouro no Brasil. Quando se assume que 50% dos garimpos utilizam retortas, a perda anual estimada é de 11,54 t/a. Este valor se aproxima com as estimativas do Toolkit do PNUMA, cujos resultados para o Brasil variam de 9,17 a 12,17 t/a.

**Tabela 17. Estimativa de perda total de mercúrio (t/a) em diferentes cenários**

Garimpos que usam retortas (%)	Garimpos que não usam retortas (%)	$Hg_{\text{Perdido}}:Au_{\text{Produzido}}$ Usam retortas	$Hg_{\text{Perdido}}:Au_{\text{Produzido}}$ Não usam retortas	Hg total Perdido (t/a) média 2020-2022
100	0	0,18	0,63	5,13
90	10	0,18	0,63	6,41
80	20	0,18	0,63	7,70
70	30	0,18	0,63	8,98
60	40	0,18	0,63	10,26
50	50	0,18	0,63	11,54
40	60	0,18	0,63	12,83
30	70	0,18	0,63	14,11
20	80	0,18	0,63	15,39
10	90	0,18	0,63	16,67
0	100	0,18	0,63	17,96

Fonte: Elaborado pelos Autores.

## 7. CONCLUSÃO

Para a consolidação desse inventário, foram considerados 32 balanços metalúrgicos de mercúrio realizados em operações da MAPE de ouro nos estados do Amapá, Amazonas, Mato Grosso e Pará. Do total, 25 balanços foram realizados em contextos com uso de retortas na queima do amálgama e 7 balanços em operações sem o uso de retortas. Em todos os casos, o material processado era explorado de depósitos secundários, com a amalgamação de concentrados.

Nas 25 operações mapeadas onde foi constatado o uso de retortas, a média de recuperação de mercúrio por filtração e condensação, foi de 75%. Nessas operações, a razão  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  foi de 0,18 e nas 7 operações mapeadas sem o uso de retortas de 0,63. Com base nos cenários analisados e na aplicação da metodologia Toolkit do PNUMA, estimou-se que as perdas combinadas de mercúrio decorrentes da MAPE de ouro no Brasil variam entre **11,4 t/a e 12,17 t/a**, considerando a média de produção de ouro entre os anos de 2020 e 2022. Para o cenário mais provável, o fator ponderado  $Hg_{\text{perdido}}:Au_{\text{produzido}}$  foi de 0,401.

Os resultados apontaram a distribuição das emissões e liberações combinadas de mercúrio por tipo de amalgamação, considerando os diferentes níveis de clandestinidade da produção aurífera. Desta forma, foi possível estimar as emissões e liberações prováveis e máximas de mercúrio decorrentes das práticas da MAPE de ouro no Brasil. No cenário provável (C=25%), as emissões atmosféricas totalizaram aproximadamente 5.371 t por ano, enquanto as liberações para o solo e água foram estimadas em 6.065 t/ano, totalizando 11,4 t/ano.

O mercúrio é amplamente utilizado nas extrações de ouro em toda a Amazônia brasileira, sendo utilizado em operações formais, informais e ilegais. Sua adoção decorre da facilidade de uso nos processos de amalgamação, que permitem a extração aurífera, sem a necessidade de infraestrutura ou investimentos em equipamentos tecnológicos. Essa característica viabiliza a operação independente de garimpeiros, muitas vezes em condições precárias e sem supervisão técnica adequada. Assim, os resultados deste estudo reforçam que o impacto ambiental da MAPE de ouro no Brasil está relacionado não apenas à ausência de novas tecnologias para uma produção limpa e responsável, mas sobretudo à ineficiência na aplicação, recuperação, descarte e contenção do mercúrio.



A extração de ouro por amalgamação resulta em baixa recuperação de ouro, pois somente partículas de ouro liberadas são capturadas pelo mercúrio. Esse modelo de operação reflete uma prática obsoleta, que contrasta com os padrões técnicos e ambientais internacionalmente recomendados para uma mineração responsável e segura. Apesar disso, é importante enfatizar os avanços ocorridos desde a década de 1990 pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e pela Companhia Matogrossense de Mineração (METAMAT) e, posteriormente, nos protagonismos das cooperativas garimpeiras no objetivo de reduzir os impactos negativos sociais e ambientais de sua atividade. Este movimento vem ganhando espaço, embora ainda careça de incentivos políticos, financeiros e institucionais para se consolidar em escala nacional.

A realização dos experimentos e observações de campo foi essencial para compreender os métodos e tecnologias aplicadas e reconhecer os saberes dos garimpeiros. Nesse sentido, os resultados do inventário reforçam o argumento de que a transição para práticas mais responsáveis na MAPE de ouro no Brasil não pode se limitar à introdução de tecnologias. Ela deve envolver estratégias participativas e treinamentos contínuos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANENE, N.C.; DANGULBI, B.M.; VEIGA, M.M. Assessment of Gold and Mercury Losses in an Artisanal Gold Mining Site in Nigeria and Its Implication on the Local Economy and the Environment. *Minerals*, v.14, n.11:1131, 2024. Doi: <https://doi.org/10.3390/min14111131>.

ARCTIC MONITORING AND ASSESSMENT PROGRAMME / UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Global Mercury Modelling: Update of Modelling Results in the Global Mercury Assessment 2013*. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UNEP Chemicals Branch. Geneva, Switzerland, 2015.

BALZINO, M.; SECCATORE, J.; MARIN, T.; DE TOMI, G. F. C.; VEIGA, M. M. Gold losses and mercury recovery in artisanal gold mining on the Madeira River, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 102, p. 370-377, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.012>.

CASTILHOS, Z. C.; DOMINGOS, L. M. B. A picture of artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in Brazil and its mercury emissions and releases. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 46, n. 3, p. 1–19, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01881-z>.

CASTILHOS, Z. C.; DOMINGOS, L. M. Relatório Final: Inventário Nacional de Emissões e Liberações de Mercúrio no Âmbito da Mineração Artesanal e de Pequena Escala no Brasil. Brasília: MMA, 2018.

CHENG, Y.; WATARI, T.; SECCATORE, J.; NAKAJIMA, K.; NANSAI, K.; TAKAOKA, M. A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Resources Policy*, 81, 103370, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103370>.

CORDY, P.; VEIGA, M. M., SALIH, I.; AL-SAAD, S.; CONSOLE, S.; GARCIA, O.; MESA, L. A.; VELÁSQUEZ-LÓPEZ, P. C.; ROESER, M. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *The Science of the total environment*, v. 410-411, p. 154-160, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>.

DRISCOLL, C. T.; MASON, R. P.; CHAN, H. M.; JACOB, D. J.; PIRRONE, N. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. *Environmental science & technology*, v. 47, n. 10, p. 4967–4983, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1021/es305071v>.

ESDAILE, L.J.; CHALKER, J. M. The mercury problem in artisanal and small-scale gold mining. *Chemistry*, v. 24, n. 27, p. 6905-6961, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1002/chem.201704840>.

FRITZ, B.; PEREGOVICH, B.; TENÓRIO, L. da S.; ALVES, A. C. da S.; SCHIMIDT, M. Mercury and CO<sub>2</sub> emissions from artisanal gold mining in Brazilian Amazon rainforest. *Nature Sustainability*, vol. 7, p. 15-22, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01242-1>.

GARCIA, O.; VEIGA, M. M.; CORDY, P.; SUESCÚN, O. E.; MOLINA, J. M.; ROESER, M. Artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: a successful case of mercury reduction. *Journal of Cleaner Production*, v. 90, p. 244–252, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.032>.

HINTON, J.; VEIGA, M. M.; VEIGA, A. T. C. Clean artisanal gold mining: a utopian approach?. *Journal of Cleaner Production*, v.11, n. 2, p. 99-115, 2003. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00031-8).

LINDQVIST, O.; RODHE, H. Atmospheric mercury—a review\*. *Tellus B*, v. 37B, n. 3, p. 136–159, 1985. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1985.tb00062.x>.

NAP.MINERAÇÃO/USP. Orientações sobre capacitação e treinamento em melhores práticas na MAPE de ouro. In: Guia para Cooperativas na Mineração Artesanal e em Pequena Escala (MAPE) no Brasil. World Bank, 2021.

O'NEILL, J. D.; TELMER, K. Estimating Mercury Use and Documenting Practices in Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM). UN Environment, Geneva, Switzerland, 2017.

ORTIZ, M. C.; SARABIA, L. A.; SÁNCHEZ, M. S., HERRERO, A. Quality of Analytical Measurements: Statistical Methods for Internal Validation, in: *Comprehensive Chemometrics*. Elsevier, pp. 17–76, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00090-9>.

PERSAUD, A.; TELMER, K. Developing Baseline Estimates of Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining Communities: A Practical Guide (Version 1.0), Artisanal Gold Council. Victoria, BC. ISBN 978-0-9939459-4-6, 2015.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Toolkit para a Identificação e Quantificação de Fontes de Mercúrio, Relatório e Diretrizes de Referência para o Inventário Nível 2, Versão 1.3, 2015. UNEP Chemicals Branch, Genebra, Suíça.

SCHROEDER, W.; MUNTHER, J. Atmospheric mercury—An overview. *Atmospheric Environment*, v. 32, n. 5, p. 809-822, 1998. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00293-8).

SELIN, H.; SELIN, N. E. From Stockholm to Minamata and beyond: Governing mercury pollution for a more sustainable future. *One Earth*, v. 5, n. 10, p. 1109–1125, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.09.001>.

SILVA, H. A. M.; KASPER, D.; MARSHALL, B. G, VEIGA, M. M, GUIMARAES, J. R. D. Acute ecotoxicological effects of Hg(CN)<sub>2</sub> in *Danio rerio* (zebrafish). *Ecotoxicology*, v. 32, n.4, p. 429-437, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02651-w> .

SOUZA, J. N.; CASTILHOS, Z. C. Avaliação das perdas de mercúrio durante a decomposição térmica de amálgama de prata com uso de retorta. In: XXIV Jornada de Iniciação Científica do CETEM, p. 211-215, 2016.

TELMER, K. H.; VEIGA, M. M. World emissions of mercury from artisanal and small scale gold mining. *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere: Emissions, Measurements and Models*, p. 131–172, 2009. Doi: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-93958-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-93958-2_6).

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. A Practical Guide: Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. United Nations Environment Programme, Global Mercury Partnership, 2012. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/report/reducing-mercury-use-artisanal-and-small-scale-gold-mining-practical-guide>>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Mercury Assessment -2018. UN Environment Programme Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland, 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Squeezing gold from a stone: How to Reduce Toxic Health Risks and Pollution Caused by Mercury Use in the Small-Scale & Artisanal Gold Mining Sector, 2009. Disponível em: < <https://www.unep.org/pt-br/node/17021>.>

VEIGA, M. M.; FERNANDES, F. R. C.; FARID, L.H.; MACHADO, J. E. B.; SILVA, A. O. da; LACERDA, L. D. de; SILVA, A. P. da.; SILVA, E. C.; MARINS, R. V.; IMBASSAHY, J.A.; PFEIFFER, W.C.; BASTOS, W. R.; SOUZA, V.P.de. Poconé: Um Campo de Estudos do Impacto Ambiental do Garimpo. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1991. (Série Tecnologia Mineral no 01). Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/406>>.

VEIGA, M. M.; GUNSON, A. J. Gravity concentration in artisanal gold mining. *Minerals*, v. 10, n. 11, p. 1-49, 1026, 2020. Doi: <https://doi.org/10.3390/min10111026>.

VEIGA, M. M.; HINTON, J. J. Abandoned artisanal gold mines in the Brazilian Amazon: A legacy of mercury pollution. *Natural Resources Forum*, v. 26, n. 1, p. 15–26, 2002. Doi: <https://doi.org/10.1111/1477-8947.00003>.

VEIGA, M.M.; BAKER, R. Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-Scale Gold Miners; Pub. GEF/UNDP/UNIDO Global Mercury Project: Vienna, Austria, 2004; p. 289. Disponível em: <<https://iwlearn.net/resolveuid/617e8a7184a7ec1e292a61c2319dc30f>>.

VELÁSQUEZ-LÓPEZ, P. C.; VEIGA, M. M.; KLEIN, B.; SHANDRO, J. A.; HALL, K. Cyanidation of mercury-rich tailings in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies to manage environmental risks in Southern Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 9–10, p. 1125–1133, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.008>.

YOSHIMURA, A.; SUEMASU, K.; VEIGA, M. M. Estimation of Mercury Losses and Gold Production by Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM). *Journal of Sustainable Metallurgy*, v.7, p. 1045–1059, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00394-8>.

## APÊNDICE A. Balanço Metalúrgico Com Uso de Retortas

Coleta	Garimpo	Minério	Dados mensurados em campo					Balanço de massa (em gramas)					Razão Hg Perdido: Au Produzido
			Hg Alimentado (g)	Hg recuperado na Filtração (g)	Hg condensado na Retorta (g)	Amálgama (g)	Doré (g)	Hg contido no amálgama (g)	Hg perdido na retorta (g) em relação ao amálgama (pirólise)	Hg perdido nos rejeitos (g)	Hg Total Recuperado (g)	Hg Total Perdido (g)	
Coleta 1	Baixão	Colúvio	279,40	189,30	84,44	295,50	205,70	89,80	5,36	0,30	273,74	5,66	0,0275
Coleta 2	Baixão	Colúvio	176,90	124,40	47,20	213,20	161,51	51,69	4,49	0,81	171,60	5,30	0,0328
Coleta 3	Baixão	Colúvio	151,00	83,50	60,60	212,60	146,10	66,50	5,90	1,00	144,10	6,90	0,0472
Coleta 4	Baixão	Colúvio	115,90	58,10	49,10	240,10	183,13	56,97	7,87	0,83	107,20	8,70	0,0475
Coleta 5	Balsa	Aluvião	157,60	140,30	10,80	27,50	14,60	12,90	2,10	4,40	151,10	6,50	0,4452
Coleta 6	Balsa	Aluvião	227,40	217,98	3,90	21,70	14,00	7,70	3,80	1,72	221,88	5,52	0,3943
Coleta 7	Balsa	Aluvião	191,60	163,20	24,90	42,70	17,70	25,00	0,10	3,40	188,10	3,50	0,1977
Coleta 8	Bancadas	Elúvio	4120,00	3489,00	543,00	1495,50	949,50	546,00	3,00	85,00	4032,00	88,00	0,0927
Coleta 9	Bancadas	Elúvio	1000,6	928,30	48,50	N/D	100,70	N/D	N/D	N/D	976,80	N/D	N/D
Coleta 10	Bancadas	Elúvio	1000,9	984,38	3,20	N/D	61,88	N/D	N/D	N/D	987,58	N/D	N/D
Coleta 11	Bancadas	Elúvio	1001,1	983,00	10,00	N/D	20,90	N/D	N/D	N/D	993,00	N/D	N/D
Coleta 12	Bancadas	Elúvio	500,8	477,67	14,60	N/D	38,10	N/D	N/D	N/D	492,27	N/D	N/D
Coleta 13	Bancadas	Elúvio	500	469,60	20,60	N/D	42,10	N/D	N/D	N/D	490,20	N/D	N/D
Coleta 14	Bancadas	Elúvio	500,5	414,70	64,10	N/D	184,00	N/D	N/D	N/D	478,80	N/D	N/D
Coleta 15	Bancadas	Elúvio	500,40	381,00	89,80	N/D	122,80	N/D	N/D	N/D	470,80	N/D	N/D
Coleta 16	Bancadas	Elúvio	1960,20	1917,40	39,40	N/D	71,60	N/D	N/D	N/D	1956,80	N/D	N/D
Coleta 17	Bancadas	Elúvio	1940,30	1924,80	12,10	N/D	22,00	N/D	N/D	N/D	1936,90	N/D	N/D
Coleta 18	Bancadas	Elúvio	2000,70	1940,40	53,20	N/D	58,40	N/D	N/D	N/D	1993,60	N/D	N/D
Coleta 19	Bancadas	Elúvio	1038,10	1026,22	5,00	31,20	22,14	9,06	4,06	2,82	1031,22	6,88	0,3107
Coleta 20	Baixão	Colúvio	66,10	39,90	12,04	65,90	53,76	12,14	0,10	14,06	51,94	14,16	0,2635
Coleta 21	Draga	Aluvião	140,20	45,90	82,10	225,20	140,03	85,17	3,07	9,13	128,00	12,20	0,0871
Coleta 22	Draga	Aluvião	547,50	450,40	82,21	171,00	88,44	82,56	0,35	14,54	532,61	14,89	0,1683
Coleta 23	Draga	Aluvião	141,60	89,70	37,62	97	54,27	42,43	4,81	9,47	127,32	14,28	0,2631
Coleta 24	Baixão	Colúvio	112,90	48,10	46,97	175	126,96	47,64	0,67	17,16	95,07	17,83	0,1404
Coleta 25	Baixão	Colúvio	116,46	52,70	51,00	141	89,10	51,70	0,70	12,06	103,70	12,76	0,1432
	<b>Média</b>		<b>739,53</b>	<b>665,60</b>	<b>59,85</b>	<b>230,28</b>	<b>119,58</b>	<b>79,15</b>	<b>3,09</b>	<b>11,78</b>	<b>725,45</b>	<b>14,87</b>	<b>0,18</b>

## APÊNDICE B. Balanço Metalúrgico Sem Uso de Retortas

Coleta	Garimpo	Minério	Dados mensurados em campo (em gramas)					Balanço de massa (em gramas)					Razão Hg Perdido: Au Produzido
			Hg Alimentado (g)	Hg recuperado na Filtração (g)	Hg Condensado (g)	Amálgama (g)	Doré (g)	Hg contido no amálgama (g)	Hg Perdido por Evaporação (g)	Hg perdido nos rejeitos (g)	Hg Total Recuperado (g)	Hg Total Perdido (g)	
Coleta 1	Baixão	Colúvio	54,0	25,80	0	63,50	37,30	26,20	2,00	25,80	28,20	0,7560	
Coleta 2	Baixão	Colúvio	95,5	17,10	0	118,30	71,50	46,80	31,60	17,10	78,40	1,0965	
Coleta 3	Baixão	Colúvio	11	0,00	0	49,50	39,20	10,30	0,20	0,00	10,50	0,2679	
Coleta 4	Baixão	Colúvio	35,6	22,50	0	22,90	13,90	9,00	4,10	22,50	13,10	0,9424	
Coleta 5	Baixão	Colúvio	211	60,80	0	600,70	494,50	106,20	44,40	60,80	150,60	0,3046	
Coleta 6	Baixão	Colúvio	34,2	22,90	0	17,40	11,40	6,00	5,30	22,90	11,30	0,9912	
Coleta 7	Baixão	Colúvio	52,8	48,70	0	108,30	108,00	0,30	3,80	48,70	4,10	0,0380	
	<b>Média</b>		<b>70,6</b>	<b>28,3</b>	<b>0,0</b>	<b>140,1</b>	<b>110,8</b>	<b>29,3</b>	<b>13,1</b>	<b>28,3</b>	<b>42,3</b>	<b>0,63</b>	

