



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DEL MERCURIO CONTENIDO  
EN LOS TUBOS DE DESCARGA (AMPOLLAS DE CUARZO) PROVENIENTES DEL  
PROCESAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDO-LÍQUIDO DE LAS  
LUMINARIAS MUNICIPALES DE MIXCO**

**Héctor Rolando Méndez Rossal**

Asesorado por la Ph.D. Casta Petrona Zeceña Zeceña  
Coasesorado por la M.Sc. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DEL MERCURIO CONTENIDO  
EN LOS TUBOS DE DESCARGA (AMPOLLAS DE CUARZO) PROVENIENTES DEL  
PROCESAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDO-LÍQUIDO DE LAS  
LUMINARIAS MUNICIPALES DE MIXCO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HÉCTOR ROLANDO MÉNDEZ ROSSAL**

ASESORADO POR LA PH.D. CASTA PETRONA ZECEÑA ZECEÑA  
COASESORADO POR LA M.SC. INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, MAYODE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DEL MERCURIO CONTENIDO  
EN LOS TUBOS DE DESCARGA (AMPOLLAS DE CUARZO) PROVENIENTES DEL  
PROCESAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDO-LÍQUIDO DE LAS  
LUMINARIAS MUNICIPALES DE MIXCO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de enero de 2013.

  
**Héctor Rolando Méndez Rossal**

Guatemala, 13 de marzo de 2013

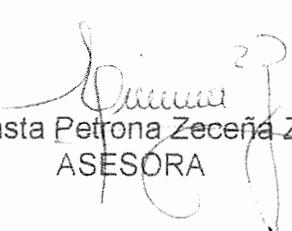
Ingeniero  
Víctor Manuel Monzón Valdez  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería / USAC  
Presente

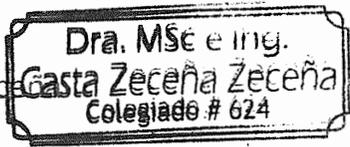
Estimado Ingeniero Monzón:

Con un cordial saludo me dirijo a usted para informarle que he asesorado y aprobado el informe final de trabajo de graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DEL MERCURIO CONTENIDO EN LOS TUBOS DE DESCARGA (AMPOLLAS DE CUARZO) PROVENIENTES DEL PROCESAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDO-LÍQUIDO DE LAS LUMINARIAS MUNICIPALES DE MIXCO”** elaborado por el estudiante de Ingeniería Química Héctor Rolando Méndez Rossal con camé 200714487. Considero que el informe final del trabajo de graduación desarrollado satisface los requisitos exigidos; por lo que solicito se sirva remitirlo para su respectiva aprobación.

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

  
Ph.D. Casta Petrona Zeceña Zeceña  
ASESORA

  
Dra. MSc e Ing.  
Casta Zeceña Zeceña  
Colegiado # 624



Guatemala, 08 de abril de 2013  
Ref. EI.Q.TG-IF.023.2013

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-094-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Héctor Rolando Méndez Rossal**

Identificado con número de carné: **2007-14487**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DEL MERCURIO CONTENIDO EN LOS TUBOS DE DESCARGA (AMPOLLAS DE CUARZO) PROVENIENTES DEL PROCESAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDO-LÍQUIDO DE LAS LUMINARIAS MUNICIPALES DE MIXCO**

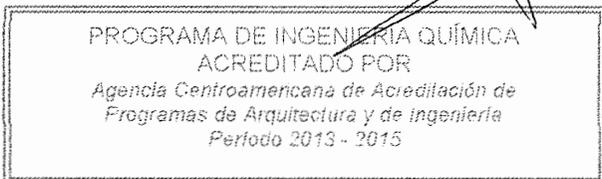
El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Casta Petrona Zeceña Zeceña**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.139.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **HÉCTOR ROLANDO MÉNDEZ ROSSAL** titulado: "**EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DEL MERCURIO CONTENIDO EN LOS TUBOS DE DESCARGA (AMPOLLAS DE CUARZO) PROVENIENTES DEL PROCESAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDO-LÍQUIDO DE LAS LUMINARIAS MUNICIPALES DE MIXCO**".  
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

  
Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2013

Cc: Archivo  
VMMV/ale



FORMANDO INGENIEROS QUÍMICOS EN GUATEMALA

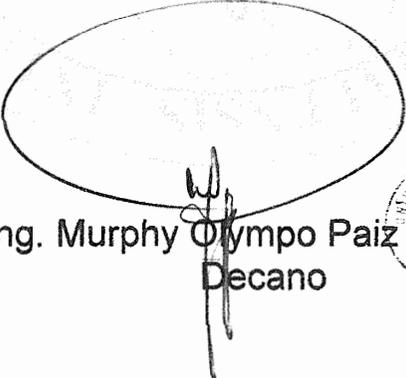
PROGRAMA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2013 - 2015





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO DEL MERCURIO CONTENIDO EN LOS TUBOS DE DESCARGA (AMPOLLAS DE CUARZO) PROVENIENTES DEL PROCESAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDO-LÍQUIDO DE LAS LUMINARIAS MUNICIPALES DE MIXCO**, presentado por el estudiante universitario: **Héctor Rolando Méndez Rossal**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, mayo de 2013

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por guiarme a lo largo de este camino y ayudarme a tomar las mejores decisiones.
<b>Mis padres</b>	Rolando Méndez Sosa y Claudia Eugenia Rossal Álvarez, este éxito es de todos y con su apoyo fue más fácil alcanzarlo.
<b>Mis hermanas</b>	Claudia y Ana Cecilia Méndez Rossal, por compartir nuestros éxitos y juntos seguir adelante.
<b>Mis abuelas</b>	Carmen Álvarez y Amalia Sosa, guías de la familia, por sus oraciones, cuidados, consejos y preocupaciones que ya han tenido sus frutos.
<b>En memoria</b>	Raúl Méndez (q.e.p.d.), Leonel Rossal (q.e.p.d.), César Recinos (q.e.p.d.).

## AGRADECIMIENTOS A:

### **Mis padres**

Por el apoyo incondicional, confianza y ayuda que me brindaron durante toda la carrera. Por quererme, aconsejarme y acompañarme en todos los momentos que viví estos años.

### **Mis hermanas**

Por compartir los momentos de alegría, tristeza y por escucharme cuando las necesité.

### **Mis abuelas**

Por la atención que me brindaron, por sus oraciones, por sus comidas y porque siempre me tuvieron en su pensamiento.

### **Carolina Corzo**

Por el buen equipo que hicimos casi desde el principio. Por acompañarme en todos mis momentos de alegría, estrés, felicidad y estudio. Porque recorrimos juntos este camino y ahora alcanzamos el fin con el éxito que siempre nos propusimos.

### **Mis tíos**

Mario Méndez, Héctor Méndez, Ingrid Rossal, Lily Rossal y todos los demás que siempre me han mostrado su apoyo, su interés, su ayuda y su confianza en mí.

**Mis primos**

Javier Rossal, Ericka Vásquez, Andrea Vásquez y todos los demás por los momentos que pasamos juntos y que me motivan a seguir adelante.

**Mis amigos**

Por todo los momentos que compartimos que hicieron que estos años sean de los mejores de mi vida.

**Ing. César García**

Por la continua enseñanza, por compartir todos sus conocimientos, su generosidad y apoyo cuando lo necesitamos.

**M. Sc. Ingrid Benítez**

Por su continuo apoyo, cariño, amistad y por todos esos momentos que hemos compartido que me han ayudado a ser mejor persona tanto personal como profesionalmente.

**Ph. D. Casta Zeceña**

Por darme la oportunidad de incorporarme a este proyecto, que es ahora uno de los más importantes de mi vida.

**Universidad de San Carlos de Guatemala**

Por brindarme los conocimientos que me formaron y presentarme a personas que me brindaron todos sus conocimientos para mi desarrollo profesional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN .....	XIX
OBJETIVOS/HIPÓTESIS .....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Lámparas de vapor mercurio .....	7
2.1.1. Generalidades.....	7
2.1.2. Lámparas de descarga .....	8
2.1.3. Generación de luz visible .....	10
2.1.4. Funcionamiento lámparas de mercurio .....	12
2.1.5. Lámparas de mercurio de baja presión.....	13
2.1.6. Lámparas de mercurio de alta presión.....	14
2.1.7. Componentes de las lámparas de alta presión .....	15
2.1.7.1. Tubo de descarga .....	16
2.1.7.2. Ampolla de vidrio de borosilicato.....	16
2.1.7.3. Balastro.....	17
2.1.7.4. Casquillo .....	17
2.1.7.5. Resistencia de arranque .....	17
2.1.7.6. Soporte de montaje.....	18
2.1.8. Datos característicos de las lámparas .....	18

2.1.9.	Características de manipulación.....	19
2.1.10.	Factores que influyen sobre el funcionamiento.....	20
2.1.11.	Desechos generados.....	21
2.1.11.1.	Desechos sólidos.....	21
2.1.11.2.	Desechos líquidos .....	24
2.1.12.	Alternativas para el tratamiento de los desechos generados.....	24
2.1.12.1.	Reciclaje de lámparas de mercurio de baja presión .....	25
2.1.12.2.	Confinamiento en rellenos sanitarios de seguridad .....	26
2.1.12.3.	Reciclaje de lámparas de descarga.....	27
2.2.	Mercurio.....	27
2.2.1.	Propiedades fisicoquímicas .....	28
2.2.2.	Usos y aplicaciones .....	28
2.2.3.	Ciclo del mercurio en el ambiente.....	29
2.2.4.	Toxicología .....	33
2.2.4.1.	Mercurio elemental .....	34
2.2.4.2.	Metilmercurio .....	34
2.2.5.	Efectos en la salud humana.....	35
2.2.6.	Efecto en el medio ambiente .....	36
2.3.	Plomo .....	37
2.3.1.	Propiedades fisicoquímicas .....	38
2.3.2.	Usos y aplicaciones .....	38
2.3.3.	Efectos en la salud humana.....	39
2.3.4.	Efectos en el medio ambiente.....	40
2.4.	Tungsteno (Wolframio) .....	41
2.4.1.	Propiedades fisicoquímicas .....	42
2.4.2.	Usos y aplicaciones .....	42

2.4.3.	Efectos en la salud humana.....	43
2.4.4.	Efectos en el medio ambiente.....	43
2.5.	Tratamiento térmico para la recuperación de mercurio metálico.....	44
2.5.1.	Mufla .....	45
2.6.	Amalgama.....	45
2.6.1.	Aleaciones.....	45
2.6.2.	Tipos de amalgamas.....	46
2.6.3.	Propiedades.....	46
2.6.4.	Clasificación amalgamas .....	47
2.6.5.	Amalgamamiento y técnicas de obtención.....	48
2.6.6.	Amalgama de cobre .....	49
	2.6.6.1. Procedimiento de amalgamamiento.....	50
	2.6.6.2. Diagrama de fases sistema cobre-mercurio .....	50
2.7.	Reacciones redox .....	52
2.7.1.	Hemirreacciones .....	52
	2.7.1.1. Hemirreacción de oxidación.....	53
	2.7.1.2. Hemirreacción de reducción.....	53
2.7.2.	Potencial de reducción.....	54
2.7.3.	Reacciones redox en la investigación.....	55
2.8.	Técnicas instrumentales .....	62
2.8.1.	Espectrometría de absorción atómica.....	62
	2.8.1.1. Fundamentos .....	63
2.8.2.	Fluorescencia de rayos X.....	64
	2.8.2.1. Fundamentos .....	65

3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	67
3.1.	Variables.....	67
3.1.1.	Variables de control .....	67
3.1.2.	Variables independientes .....	70
3.1.3.	Variables dependientes .....	72
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	74
3.3.	Recurso humano disponible .....	75
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	75
3.4.1.	Localización .....	75
3.4.2.	Materiales (desechos) .....	75
3.4.3.	Equipo.....	76
3.4.4.	Cristalería, equipo de laboratorio y materiales.....	78
3.4.5.	Reactivos .....	81
3.5.	Técnica cuantitativa .....	81
3.6.	Recolección de la información.....	82
3.7.	Tabulación y ordenamiento de datos.....	89
3.8.	Procesamiento de la información .....	95
3.9.	Análisis estadístico .....	106
3.10.	Plan de análisis de los resultados .....	108
3.10.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables .....	109
3.10.2.	Programas a utilizar para análisis de datos .....	109
4.	RESULTADOS.....	111
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	127
	CONCLUSIONES .....	145
	RECOMENDACIONES.....	147

BIBLIOGRAFÍA .....	149
APÉNDICES.....	155
ANEXOS .....	187



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Lámparas de vapor de mercurio.....	7
2.	Descarga eléctrica a través de un tubo de descarga.....	8
3.	Excitación atómica y emisión de radiación .....	10
4.	Generación radiación visible.....	11
5.	Lámpara de vapor de mercurio de baja presión .....	14
6.	Espectro de emisión de las lámparas de alta presión.....	15
7.	Componentes de las lámparas de mercurio .....	16
8.	Temperatura del color.....	18
9.	Desecho de vidrio lámparas de mercurio .....	22
10.	Desechos cuarzo lámparas de mercurio .....	22
11.	Desecho de aluminio de lámparas de mercurio.....	23
12.	Desechos de tungsteno en lámparas de mercurio .....	23
13.	Mercurio contenido en el tubo de descarga.....	24
14.	Relleno sanitario de seguridad .....	26
15.	Mercurio metálico .....	29
16.	Ciclo del mercurio en el ambiente .....	31
17.	Plomo elemental.....	37
18.	Tungsteno.....	41
19.	Diagrama de fases sistema cobre – mercurio .....	51
20.	Hemirreacción de oxidación .....	53
21.	Hemirreacción de reducción .....	54
22.	Reacción redox entre cobre y zinc .....	57
23.	Reacción redox de zinc con el ácido clorhídrico.....	59

24.	Reacción redox del ácido nítrico y el mercurio metálico.....	60
25.	Reacción redox del ácido nítrico y el plomo metálico.....	61
26.	Reacción redox del ácido nítrico y el tungsteno metálico.....	62
27.	Desechos del alumbrado público (tubos de descarga).....	76
28.	Recuperación y tratamiento del mercurio de los desechos de las lámparas de alta presión .....	83
29.	Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga mediante tratamientos térmicos .....	84
30.	Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga posterior a los tratamientos térmicos.....	85
31.	Balance de masa de las especies reactivas en el proceso de inmovilización mediante procedimiento de amalgamamiento .....	86
32.	Evaluación de la reacción redox entre el cobre y zinc en base a la proporción molar.....	87
33.	Proceso de inmovilización del mercurio mediante un procedimiento de amalgamamiento a partir de una solución de sulfato de cobre reducido con zinc metálico.....	88
34.	Recuperación de mercurio metálico de los tubos de descarga con gota de mercurio metálico formada .....	111
35.	Recuperación de mercurio metálico de los tubos de descarga sin gota de mercurio formada en función del tiempo de duración del tratamiento .....	112
36.	Recuperación de mercurio metálico de los tubos de descarga sin gota de mercurio formada mediante tratamiento térmico en función de la temperatura.....	113
37.	Mercurio metálico remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos.....	114

38.	Porcentaje de cobre reducido en la reacción redox a dos fases entre el cobre $[Cu^{+2}] = 0,814 \text{ M}$ y zinc elemental ( $Zn^0$ ) para un tiempo de reacción de 5 minutos.....	115
39.	Amalgama de cobre sólida formada.....	117
40.	Representación química de la proporción cobre: mercurio en la amalgama de cobre experimental.....	118
41.	Porcentaje de zinc en exceso en el procedimiento de amalgamamiento.....	119
42.	Proporción másica experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento.....	120
43.	Tratamiento térmico tubos de descarga.....	121
44.	Formación gota de mercurio.....	122
45.	Equipo de apertura de tubos de descarga.....	122
46.	Agitación tubos de ensayo.....	123
47.	Filtración desecho.....	124
48.	Encapsulado de los desechos tóxicos.....	124
49.	Cilindros de concreto con desechos sólidos tóxicos.....	125
50.	Entrega cilindros con desechos tóxicos a empresa autorizada para su disposición final.....	125
51.	Tubos de descarga con gota de mercurio metálico formada.....	128
52.	Tubos de descarga sin gota de mercurio metálico formada.....	129
53.	Mercurio total detectado en las ampollas de cuarzo.....	133
54.	Coloración de la solución de sulfato de cobre pentahidratada a los 5 minutos de reacción.....	136
55.	Factor para determinar el volumen de la solución de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0,81 M requerido para el procedimiento de amalgamamiento.....	138
56.	Factor para determinar la masa de zinc metálico requerida para el procedimiento de amalgamamiento.....	138

## TABLAS

I.	Comparación datos característicos entre lámparas de vapor de mercurio de baja y alta presión .....	19
II.	Descripción de las variables de control.....	67
III.	Descripción de las variables independientes .....	70
IV.	Descripción de las variables dependientes .....	72
V.	Descripción del equipo.....	76
VI.	Cristalería, equipo de laboratorio y materiales.....	79
VII.	Evaluación del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) con gota de mercurio formada.....	89
VIII.	Evaluación del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) por tratamientos térmicos .....	90
IX.	Evaluación del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) con gota de mercurio integrada.....	91
X.	Evaluación del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico .....	91
XI.	Plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga .....	92
XII.	Puntos curva de calibración de analista.....	93
XIII.	Evaluación de la reacción redox en función de la proporción zinc-cobre para un tiempo de reacción de 5 minutos.....	94
XIV.	Formación de amalgama de cobre .....	94
XV.	Evaluación del procedimiento de amalgamamiento con cobre por analista. ....	95
XVI.	Procesamiento de la información de la evaluación del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga con gota de mercurio.....	96
XVII.	Procesamiento de la información del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga por tratamiento térmico.....	97

XXVIII.	Procesamiento de la información del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) con gota de mercurio formada .....	98
XIX.	Procesamiento de la información del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) sin gota de mercurio formada .....	99
XX.	Procesamiento de la información moles reducidos de cobre .....	101
XXI.	Porcentaje de reducción de cobre por fotometría.....	102
XXII.	Determinación de moles de cobre amalgamados en el proceso de inmovilización del mercurio .....	102
XXIII.	Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento .....	103
XXIV.	Procesamiento de la información proporción molar amalgama de cobre.....	104
XXV.	Procesamiento de información porcentaje de mercurio tratado por amalgamamiento.....	105
XXVI.	Procesamiento de información de la evaluación mediante balance de masa de la proporción experimental del desecho generado .....	106
XXVII.	Detección de plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos.....	114
XXVIII.	Modelo matemático .....	115
XXIX.	Formación de amalgama de cobre sólida .....	116
XXX.	Balance de masa del proceso de inmovilización del mercurio metálico.....	116
XXXI.	Evaluación de la solución de sulfato de cobre posterior al procedimiento de amalgamamiento .....	117

XXXII.	Proporción molar de cobre: mercurio experimental en el procedimiento de amalgamamiento .....	117
XXXIII.	Porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento.....	118
XXXIV.	Porcentaje de zinc en exceso promedio en el procedimiento de amalgamamiento .....	119
XXXV.	Proporción experimental promedio del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento .....	120
XXXVI.	Factores de reactivos para el procedimiento de inmovilización ...	123

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Absorbancia
F	Absorbancia final $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
$F_o$	Absorbancia inicial $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
ac	Amalgama de cobre
$\text{Cu}^{+2}$	Cobre en estado de oxidación 2
m	Constante del modelo lineal
b	Constante del modelo lineal
DAC	Desecho del procedimiento de amalgamamiento
D	Desviación estándar
°C	Grados Celsius
$M_m$	Masa molar
Hg	Mercurio agregado en el procedimiento de amalgamamiento
$\text{Hg}^{+2}$	Mercurio en estado de oxidación 2
$\text{Hg}^0$	Mercurio metálico
HgR	Mercurio metálico recuperado por tratamiento térmico
mg	Miligramos
mL	Mililitros
min	Minutos
M	Molaridad
$[\text{Cu}^{+2}]$	Molaridad de la concentración de cobre en solución
mol	Moles
$n_{\text{Cu}}$	Moles de cobre en amalgama

<b><math>n_f</math></b>	Moles de cobre finales
<b><math>n_o</math></b>	Moles de cobre inicial
<b><math>n_{red}</math></b>	Moles de cobre reducidos
<b><math>n_{Hg}</math></b>	Moles de mercurio en amalgama
<b>#</b>	Número
<b>Pbr</b>	Plomo remanente en el tubo de descarga
<b>%</b>	Porcentaje
<b>%Cu</b>	Porcentaje de cobre reducido
<b>%Hg<sub>i</sub></b>	Porcentaje de mercurio inmovilizado
<b>%ac</b>	Porcentaje másico de la amalgama de cobre en el desecho del procedimiento de amalgamamiento
<b>%Zn</b>	Porcentaje másico de zinc en el desecho del procedimiento de amalgamamiento
<b>P</b>	Promedio
<b>Cu:Hg</b>	Proporción molar cobre/ mercurio
<b>Zn:Cu</b>	Proporción molar zinc/ cobre
<b>CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O</b>	Sulfato de cobre pentahidratado
<b>Wr</b>	Tungsteno remanente en el tubo de descarga
<b>V</b>	Volumen de solución CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O
<b>Zn<sub>ex</sub></b>	Zinc agregado en exceso
<b>Zn<sup>+2</sup></b>	Zinc en estado de oxidación 2
<b>Zn<sup>0</sup></b>	Zinc metálico
<b>Zn<sub>o</sub></b>	Zinc metálico agregado

## GLOSARIO

<b>Absorbancia</b>	Medida de la atenuación de una radiación al atravesar una sustancia, se expresa como el logaritmo de la relación entre la intensidad de salida y la de entrada.
<b>Amalgama</b>	Aleación de mercurio con otro metal.
<b>Balance de masa</b>	Es la aplicación de la ley de la conservación de la materia, donde la masa no se crea ni se destruye solo se transforma.
<b>CII</b>	Centro de Investigaciones de Ingeniería.
<b>Concentración</b>	Magnitud que expresa la cantidad de una sustancia, en relación a la proporción entre el soluto y el disolvente.
<b>Desecho</b>	Cualquier tipo de material producido por una actividad que queda después de haber aprovechado lo útil y que está destinado a ser desechado.
<b>FIUSAC</b>	Facultad de Ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala.

<b>Gravimetría</b>	Análisis cuantitativo de una sustancia por medio de la pesada.
<b>Inmovilizar</b>	Hacer que algo quede inmóvil, sin movimiento o fluidez.
<b>LAFIQ</b>	Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos.
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
<b>Mol</b>	Cantidad de una sustancia química cuyo peso es su peso molecular expresado en gramos.
<b>Oxidación</b>	En una reacción redox, es la pérdida o donación de uno o más electrones por una especie.
<b>Precipitado</b>	Materia sólida producida por efecto de ciertas reacciones químicas y se deposita debido a su solubilidad.
<b>Procedimiento</b>	Es un método de ejecución, en forma secuenciada y sistemática de las actividades que se deben realizar en la consecución de un fin.
<b>Proporción</b>	Correspondencia debida de las partes de una cosa con el todo o entre cosas relacionadas entre sí.

<b>Reacción redox</b>	Reacción oxido-reducción que ocurre mediante transferencia de electrones entre la especie que se oxida y la que se reduce.
<b>Recuperación</b>	Obtener nuevamente algo que se tenía.
<b>Reducción</b>	En una reacción redox, es la ganancia de uno o más electrones por una especie.
<b>Remanente</b>	Aquello que queda de algo.
<b>Tratamiento</b>	Procedimiento de trabajo de ciertas materias y desechos para su transformación y reducción de su impacto ambiental.

<p>         1. The first part of the book is devoted to a study of the history of the development of the theory of the structure of the atom. It begins with the discovery of the electron by Cathode ray experiment and continues with the discovery of the proton and the neutron. The author then discusses the development of the Bohr model of the atom and the quantum theory of the atom.       </p>	<p>         Chapter I ..... 127       </p>
<p>         2. The second part of the book is devoted to a study of the structure of the atom. It begins with the discovery of the electron by Cathode ray experiment and continues with the discovery of the proton and the neutron. The author then discusses the development of the Bohr model of the atom and the quantum theory of the atom.       </p>	<p>         Chapter II ..... 133       </p>
<p>         3. The third part of the book is devoted to a study of the structure of the atom. It begins with the discovery of the electron by Cathode ray experiment and continues with the discovery of the proton and the neutron. The author then discusses the development of the Bohr model of the atom and the quantum theory of the atom.       </p>	<p>         Chapter III ..... 139       </p>
<p>         4. The fourth part of the book is devoted to a study of the structure of the atom. It begins with the discovery of the electron by Cathode ray experiment and continues with the discovery of the proton and the neutron. The author then discusses the development of the Bohr model of the atom and the quantum theory of the atom.       </p>	<p>         Chapter IV ..... 145       </p>
<p>         5. The fifth part of the book is devoted to a study of the structure of the atom. It begins with the discovery of the electron by Cathode ray experiment and continues with the discovery of the proton and the neutron. The author then discusses the development of the Bohr model of the atom and the quantum theory of the atom.       </p>	<p>         Chapter V ..... 151       </p>

## RESUMEN

Esta investigación forma parte del proyecto de investigación *FODECYT* 19-2010 “Determinación, evaluación y propuesta del manejo de los desechos del alumbrado público en el departamento de Guatemala” y tiene como objetivo principal el desarrollo de un procedimiento de recuperación y tratamiento de los desechos de mercurio provenientes de los tubos de descarga (ampolla de cuarzo) de las lámparas de mercurio a alta presión del alumbrado público de Mixco.

Los desechos de las lámparas de mercurio, en su mayoría, son dispuestos en los vertederos municipales y debido a la fragilidad del vidrio y el cuarzo, el mercurio es liberado e ingresa al ciclo del mercurio en el ambiente. Debido a esto es importante el desarrollo de un procedimiento de recuperación y tratamiento del mercurio contenido en los tubos de descarga.

El estudio se dividió en dos etapas principales, la recuperación del mercurio metálico y la del tratamiento para su inmovilización. La primera, se evaluó mediante tratamientos térmicos, los tubos de descarga se clasificaron en base a la presencia o ausencia del mercurio en forma de gota, los primeros se sometieron a 200 grados Celsius durante 15 minutos y los segundos se evaluaron en función de 3 temperaturas (400, 600 y 800 grados Celsius) y 3 tiempos de duración (30, 60 y 90 minutos). Los resultados no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo el tratamiento a 400 grados Celsius presentó la menor variación, por lo que se eligió dicha temperatura durante 30 minutos como el tratamiento térmico para el procedimiento técnico desarrollado.

Se verificó la remanencia de mercurio, plomo y tungsteno en los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) mediante un tratamiento químico y se utilizaron técnicas de espectrometría de absorción atómica y fluorescencia de rayos X para su detección, siendo positivo para el mercurio y negativo para el tungsteno y el plomo. Con ello, se determinó que no se recupera el mercurio en su totalidad y los tubos de descarga se consideran tóxicos aún después del tratamiento térmico.

La segunda etapa consistió en la evaluación del proceso de inmovilización del mercurio mediante un procedimiento de amalgamamiento con cobre, reducido a partir de una reacción redox con zinc elemental. Se determinó experimentalmente que la proporción 2 a 1 de zinc: cobre, así como 3 a 1 de cobre: mercurio garantizan la formación de la amalgama sólida y se estableció que el 99,99 por ciento del mercurio se inmovilizó mediante este procedimiento.

Asimismo, se determinó que el procedimiento de amalgamamiento es repetible y reproducible ya que no existen diferencias significativas entre los resultados de los diferentes analistas. Por último, mediante un balance de masa se estableció que el zinc, el agente reductor, se encuentra en un  $75,19 \pm 4,42$  por ciento en exceso, el cual representa un 45 por ciento de la masa del desecho generado, siendo el restante la masa de amalgama de cobre.

En base a los resultados obtenidos, se logró el desarrollo del procedimiento técnico de recuperación y tratamiento del mercurio contenido en los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) provenientes de los desechos del alumbrado público.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar un procedimiento de recuperación y tratamiento químico del mercurio contenido en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo), componente de las luminarias de alta presión utilizadas en los sistemas de iluminación municipal.

### Específicos

1. Evaluar la recuperación del mercurio metálico procedente del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamiento térmico, en función de 4 temperaturas y 3 tiempos de tratamiento seleccionados.
2. Evaluar el tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos seleccionados.
3. Evaluar el proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento.
4. Determinar el porcentaje de mercurio inmovilizado por el procedimiento de amalgamamiento con cobre.
5. Determinar mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento.

# HIPÓTESIS

## Hipótesis de trabajo

Es posible desarrollar un procedimiento de recuperación y tratamiento del mercurio contenido en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) de las luminarias de alta presión utilizadas en los sistemas de iluminación de la Municipalidad de Mixco.

## Hipótesis de investigación ( $H_i$ )

$H_1$ : La cantidad de mercurio recuperado por tratamiento térmico de los tubos de descarga (ampolla de cuarzo) varía en función de la temperatura y el tiempo de duración.

$H_2$ : El proceso de inmovilización del mercurio por amalgamamiento varía en función del analista que lo ejecuta.

## Hipótesis Nula ( $H_o$ )

$H_{o1}$ : La cantidad de mercurio recuperado por tratamiento térmico de los tubos de descarga (ampolla de cuarzo) no varía en función de la temperatura y el tiempo de duración.

$H_{o2}$ : El proceso de inmovilización del mercurio por amalgamamiento no varía en función del analista que lo ejecuta.

## INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico permite el desarrollo de productos con nuevas características, mayores alcances y mejores eficiencias. La industria de la iluminación no es la excepción y conforme los años se han desarrollado nuevas tecnologías que sustituyen las de décadas atrás.

Las lámparas de mercurio de alta presión son uno de estos casos ya que en el mercado actual presentan grandes desventajas, no solo en sus características de operación sino también en el impacto ambiental que generan. Desde varios años atrás, han experimentado una disminución en su demanda y son sustituidas a nivel mundial por lámparas con mejores eficiencias, como las lámparas de sodio, incluso, con tecnologías más recientes como lo son las lámparas LED.

En Guatemala, se han desarrollado iniciativas y proyectos de sustitución de las lámparas de mercurio, estos, han generado toneladas de desechos, los cuales son considerados tóxicos por el contenido de mercurio. Todos estos desechos han sido dispuestos en los vertederos municipales, a excepción del municipio de Mixco, donde son almacenados.

En los vertederos municipales el mercurio es liberado debido a la fragilidad del cuarzo y del vidrio, materiales de los que están compuestos los tubos de descarga y las lámparas, siendo así como este ingresa a los ecosistemas y al ciclo del mercurio, donde se genera el impacto negativo en el ambiente. El mercurio y sus especies orgánicas son tóxicas y a concentraciones altas afectan el sistema nervioso humano, pudiendo causar la muerte. Además, este

metal pesado se bioacumula en el tejido adiposo y biomagnifica a lo largo de la cadena trófica alcanzando concentraciones mayores en cada eslabón hasta alcanzar los límites tóxicos.

De acuerdo al inventario nacional de lámparas del 2012, todavía son más de 25 000 las lámparas de este tipo que se encuentran instaladas únicamente en el departamento de Guatemala, además, que las lámparas por las que están siendo sustituidas también contienen una cantidad de mercurio, por lo que la generación de estos desechos continuará.

El problema no radica en la sustitución de las lámparas, el problema es la falta de protocolos y de procedimientos técnicos para la disposición final de los desechos, en especial, los desechos tóxicos de mercurio.

A partir de este problema se propuso la evaluación de un procedimiento de recuperación y tratamiento del mercurio proveniente de los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) para el desarrollo de un procedimiento técnico de disposición de los desechos tóxicos producidos por el alumbrado público.

## 1. ANTECEDENTES

En el 2010, en la Escuela de Ingeniería Química en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala se formuló el proyecto "Determinación, evaluación y propuesta del manejo de los desechos del alumbrado público en el departamento de Guatemala" el cual busca encontrar una metodología de tratamiento y manejo de todos los desechos sólidos generados por el alumbrado público, este proyecto es cofinanciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT) en su línea del Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (FODECYT) identificado como el proyecto 19-2010, además de la Facultad de Ingeniería de la USAC.

En los primeros acercamientos del grupo de investigación con las municipalidades del departamento de Guatemala se descubrió que los desechos del alumbrado público son almacenados únicamente en el municipio de Mixco, en grandes bodegas en donde no existe control en cuanto a la acumulación que se tiene de estos, mientras que en el resto de municipios no se tiene un control ni un sistema de recolección y únicamente son dispuestos en los basureros municipales.

Actualmente, el proyecto de investigación se encuentra en fase de finalización, y se logró la identificación del procedimiento de disposición de los desechos no tóxicos, además que se tienen procedimientos de capacitación para el personal que trabaja con estos. Por último y de gran importancia son los procedimientos desarrollados de apertura del bombillo y de los tubos de descarga, los cuales se pueden observar en la sección de apéndice de este trabajo de investigación.

En mayo del 2010, el ingeniero industrial Alex Suntecún Castellanos presentó el trabajo de graduación de postgrado “Tratamiento primario desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las municipalidades de Guatemala”, en este se tiene como objetivo evaluar una técnica de separación de todos los componentes de las lámparas de mercurio de alta presión, además de su cuantificación y de esa manera establecer el impacto que tiene sobre el ambiente el desecharlos en los vertederos municipales.

Esta investigación logró determinar el peso que representa cada componente de las lámparas de mercurio y su magnificación como desecho al tomar en cuenta la cantidad de estas lámparas que se encontraban instaladas, 320 000 en el 2010, al igual, que tras la identificación de las partes de la bombilla, se procedió a evaluar el peso de cada componente y la clasificación del tipo de material por el cual estaban fabricados. Un resultado importante de esta investigación fue la cantidad de desechos sólidos generados por las lámparas instaladas, estos alcanzaban un valor de 1 710 080 kilogramos.

En el panorama nacional, se han tenido iniciativas para la sustitución de las lámparas de mercurio pero no tanto enfocado en el aspecto del impacto ambiental que generan sus desechos sólidos, si no, por el ahorro energético que se obtiene de la sustitución por lámparas de mayor eficiencia.

En enero del 2010, se publicó un artículo en El Periódico de Guatemala, en el cual se explica que el Ministerio de Energía y Minas (MEM) como parte del plan de reducción energética del país lanzará la licitación de compra de focos que son ahorradores de energía para la sustitución de las bombillas de mercurio. Se explica, además, que se busca la compra de bombillos de sodio a alta presión, o de tecnología LED ya que con estas se obtienen ahorros

energéticos del 30 y el 50 por ciento en comparación al consumo de las de mercurio. Por último, enuncian la existencia de 320 000 lámparas de mercurio.

Refiriéndose al mismo proyecto, en mayo de 2010 en la página web de Siglo21 (<http://www.s21.com.gt>): “El proyecto que está elaborando el Ministerio de Energía y Minas (MEM) de sustituir las 303 mil lámparas de vapor de mercurio en todo el país por otra tecnología más eficiente y menos contaminadora es bien visto por las comunas, las cuales esperan una reducción en el pago que hacen por alumbrado público y una disminución en la factura de los usuarios finales del servicio de energía eléctrica.”

El origen de estos proyectos nace de la Iniciativa de Ley presentada por Christian Jacques Boussinot Nuila y compañeros, con el asunto: “Iniciativa que dispone aprobar ley de ahorro energético en iluminación.”

Entre los aspectos relevantes incluidos se extraen: la composición del parque de generación eléctrica en Guatemala muestra que únicamente el 40 por ciento de la electricidad es producida con recursos renovables, mientras que el restante depende, primordialmente, de combustibles fósiles.

Considerando que los precios de los productos derivados del petróleo se han incrementado, en ocasiones, en más de doscientos por ciento en los últimos cuatro años, los costos de generación han registrado un considerable aumento y los mismo son trasladados inevitablemente al consumidor final, especialmente en el caso del alumbrado público.

La información presentada acerca de las lámparas es muy importante porque expone las pobres condiciones de operación de las lámparas de mercurio. “De acuerdo a una estimación del Ministerio de Energía y Minas,

existen alrededor de 300 000 lámparas de mercurio en el alumbrado público a nivel nacional, las cuales son poco eficientes, ya que únicamente transforman aproximadamente el 17 por ciento de la energía en luz, mientras que el resto se disipa en forma de calor y radiaciones no visibles.”

En la ley propuesta por esta iniciativa, se planteaba explícitamente la sustitución de lámparas de descarga de mercurio por lámparas de sodio a alta presión, o bien, por bombillas de halogenuros metálicos, con eficiencias como mínimo de 70 lúmenes por watt y con vida útil mínima de 10 000 horas. Sin embargo, aún no existe alguna resolución al respecto.

Para el 2012, esta ley continúa sin aprobación y en el sitio *web* de El Periódico (<http://www.elperiodico.com.gt>) se publicó un artículo acerca de la preparación de Ley de Eficiencia Energética: “El acuerdo con las municipalidades para regular la tasa de alumbrado público sería el primer paso de una estrategia del Ministerio de Energía y Minas para promover el ahorro de energía, que incluye la aprobación de la Ley de Eficiencia Energética la cual se encuentra en fase de borrador.

De acuerdo con Carmen Urizar, presidenta de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), de aplicar dicho plan de ahorro energético de una manera integral podrían ahorrarse 30 gigavatios o hasta 210 millones de dólares al año.

El plan incluye brindar financiamiento para la compra de equipos que reduzcan el consumo energético en el uso residencial, cambios de bombillas por ahorradoras, de refrigeradoras de bajo consumo y para las municipalidades cambio de luminarias de alumbrado público, en el sistema de bombeo de agua,

programas para el sector industrial y la reducción del consumo de leña. En alumbrado público podría ahorrarse hasta 30 megavatios en 2 años.”

Lamentablemente, a pesar de las iniciativas que han florecido para el ahorro energético en el alumbrado público aún no se encuentra vigente algún plan concreto, y aunque el objetivo sea el ahorro monetario, es muy importante que se lleve a cabo porque este tipo de proyecto lleva consigo una minimización en el impacto ambiental a largo plazo, sin embargo en la disposición de los desechos del alumbrado público, a corto plazo, representa un gran riesgo para el ambiente.

1. The first step in the process of identifying a problem is to recognize that a problem exists. This is often done by comparing current performance with a desired state or goal. For example, a manager might notice that sales are declining or that customer satisfaction is low. Once a problem is identified, the next step is to define it more precisely. This involves determining the scope of the problem, its causes, and its effects. For instance, a manager might define a sales decline as a 10% drop in revenue over the last quarter, caused by a decrease in the number of new customers and a loss of existing customers. The final step in the process is to prioritize the problem. This involves comparing the problem to other issues that the organization is facing and determining which one is the most important or urgent. For example, a manager might decide that a sales decline is more important than a problem with the company's IT system because it is directly affecting the company's bottom line.

## 2. MARCO TEÓRICO

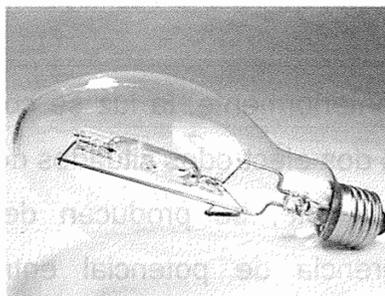
### 2.1. Lámparas de vapor mercurio

Las lámparas de vapor de mercurio, consisten en sistemas de iluminación que contienen un tubo de descarga de cuarzo relleno de vapor de mercurio. Este es sometido a una descarga eléctrica y con ello se genera la luz.

#### 2.1.1. Generalidades

En 1930 aparecen las lámparas de vapor de mercurio, las cuales fueron las primeras, cuya fuente de iluminación es el vapor de un metal, y que fueron producidas en masa para aplicaciones lumínicas. Actualmente, su utilización ha disminuido por su ineficiencia, sin embargo, debido a sus costos, su larga vida útil y su alta luminosidad todavía son de los productos principales en la iluminación de exteriores.

Figura 1. Lámparas de vapor de mercurio



Fuente: [http://www.mis-bombillas.com/Mis-Bombi-Web/Thorn-Emi\\_MBU\\_125W.htm](http://www.mis-bombillas.com/Mis-Bombi-Web/Thorn-Emi_MBU_125W.htm)

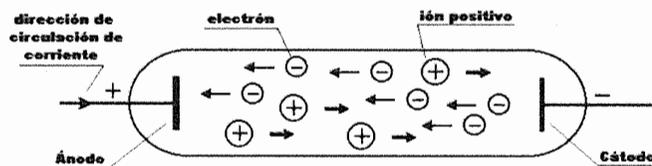
Consulta: octubre de 2012.

### 2.1.2. Lámparas de descarga

Este tipo de lámparas consiguen emitir la luz por excitación de un gas que es sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos son usualmente más eficientes que la incandescencia para producir radiación luminosa.

Si sobre un gas cualquiera, confinado en un espacio o tubo de descarga con dos electrodos, se aplica un campo eléctrico y, dado que dentro del gas normalmente no se encuentran electrones libres, la conducción sólo puede tener lugar si se ionizan los átomos del gas, obteniéndose electrones e iones positivos. Este flujo de iones y electrones a través del gas se llama descarga, en la que los electrones se desplazan hacia el ánodo y los iones hacia el cátodo.

Figura 2. Descarga eléctrica a través de un tubo de descarga



Fuente: O'DONELL, Beatriz M. Fuentes Luminosas. p. 9.

Como se mencionó anteriormente, la luz se consigue estableciendo una corriente eléctrica entre los dos electrodos situados dentro del tubo lleno con el gas o vapor ionizado, en este, se producen descargas eléctricas como consecuencia de la diferencia de potencial entre los electrodos. Estas descargas provocan un flujo de electrones que atraviesa el gas.

Cuando uno de ellos choca con los electrones de las capas externas de los átomos les transmite energía y pueden suceder dos situaciones:

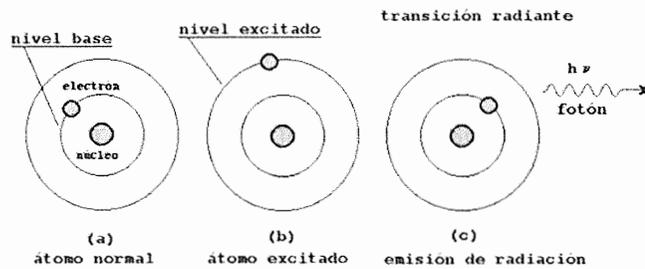
- La energía transmitida en el choque puede ser lo suficientemente elevada como para poder arrancar al electrón de su orbital. Este, puede a su vez, chocar con los electrones de otros átomos repitiendo el proceso. Si este proceso no se limita, puede provocar la destrucción de la lámpara por un exceso de corriente.
- El electrón puede no recibir suficiente energía para ser arrancado. En este caso, el electrón pasa a ocupar otro orbital de mayor energía. Este nuevo estado es inestable y rápidamente vuelve al orbital inicial. Al hacerlo, el electrón libera la energía extra en forma de radiación electromagnética, ultravioleta (UV) o visible. Un electrón no puede tener un estado energético cualquiera, sino que sólo puede ocupar unos pocos estados que vienen determinados por la estructura atómica del átomo.

Como la longitud de onda de la radiación emitida es proporcional a la diferencia de energía entre los estados iniciales y finales del electrón y los estados posibles no son infinitos, es fácil comprender que el espectro de estas lámparas sea discontinuo. Es por ello, que la luz que se emite en este tipo de lámparas no es blanca y que su capacidad de reproducir los colores es menor que en las lámparas incandescentes. La Figura 2 siguiente explica este comportamiento.

A medida que el campo eléctrico aumenta, los iones y electrones adquieren más energía y chocan con otros átomos de modo que la ionización aumenta produciéndose para un dado valor de tensión un proceso acumulativo de avalancha. Si la velocidad de ionización excede a la velocidad de

recombinación de iones y electrones, se produce un aumento rápido en la descarga y por tanto la tensión en la descarga cae, lo que explica la característica negativa de la relación tensión-corriente en las descargas. Por este motivo es necesario el uso de diseños limitantes de corriente, llamados balastos, resistivos si la tensión aplicada es continua o, inductiva para alterna.

Figura 3. **Excitación atómica y emisión de radiación**



Fuente: O'DONELL, Beatriz M. Fuentes Luminosas. p. 5.

### 2.1.3. **Generación de luz visible**

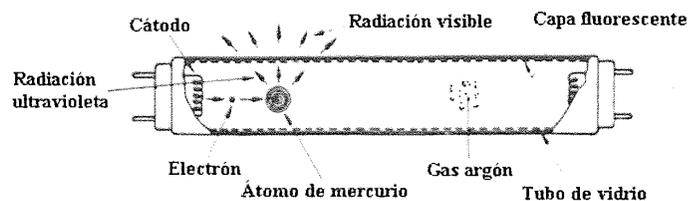
Las lámparas de vapor de mercurio son un tipo de lámparas de descarga en donde el gas contenido es mercurio y la presión sometida puede ser alta o baja, adquiriendo propiedades y características luminosas específicas. En el apartado anterior, se explicó la generación de radiación ultravioleta o visible, siendo esta la que se encuentra en menor cantidad. El tipo de radiación se debe a la excitación del vapor del metal debido a las descargas eléctricas en la lámpara, sin embargo, es necesaria la conversión de la radiación ultravioleta en visible.

La generación de luz en este tipo de lámparas es posible por el fenómeno de fluorescencia, el cual consiste en que determinadas sustancias

luminiscentes, al ser excitadas por la radiación ultravioleta del vapor de mercurio transforman esta radiación invisible en otra con una longitud de onda más larga, la cual se encuentra dentro del espectro visible.

Cuando la lámpara se encuentra conectada en el circuito correspondiente, la corriente eléctrica que atraviesa los electrodos, los calienta y les hace emitir electrones, iniciándose la descarga si la tensión aplicada entre los extremos es suficiente. El calor producido, evapora rápidamente el mercurio por lo que la descarga se mantiene en una atmósfera de mayor conductividad, mezcla del argón y el vapor de mercurio.

Figura 4. **Generación radiación visible**



Fuente: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, Facultad Regional Córdoba, Argentina.  
Lámparas y Sus Componentes. p. 10.

Los electrones así obtenidos, en su recorrido de un extremo a otro del tubo, chocan con los átomos de mercurio y la energía desprendida en el choque se transforma en radiaciones ultravioleta y por lo tanto invisibles, pero capaces de excitar la capa fluorescente, un recubrimiento de fósforo en polvo en el interior del vidrio cilíndrico de la lámpara, con lo que se logra la emisión de luz visible.

#### **2.1.4. Funcionamiento lámparas de mercurio**

La mayoría de las lámparas de mercurio se construyen con doble envoltura, estas se describen en los párrafos siguientes.

La interior o tubo de descarga, está relleno de un gas inerte (argón) y una cantidad de mercurio. Al inicio, cuando se enciende la lámpara, se aplica todo el voltaje del circuito abierto a lo largo del arco del tubo. La distancia entre los electrodos es tan grande que resulta en un gradiente de voltaje bajo que no permite la ionización del argón. Sin embargo, el mismo voltaje se aplica entre el electrodo inicial y el auxiliar mediante una resistencia. La diferencia entre estos electrodos es mucho menor y el gradiente de voltaje es suficientemente alto para provocar la ionización.

Se produce una pequeña descarga y la resistencia limita el flujo de corriente hasta una milésima del flujo de corriente normal, entre 3 000 y 5 000 voltios. Se producen los electrones, iones y fotones logrando así la descarga entre los electrodos principales, sobrepasando la resistencia inicial, el argón en el interior de la ampolla de cuarzo se va ionizando lentamente, apareciendo una luminosidad azul difusa característica y favoreciéndose la generación del arco principal.

Tras la ionización del gas, inicia el calentamiento de la lámpara, el mercurio se vaporiza completamente, sublimándose y la presión aumenta. La descarga opera en vapor de mercurio insaturado a presiones variadas entre 18 y 2 bares. Es entonces cuando se produce la emisión de radiación ultravioleta y se sigue el procedimiento explicado anteriormente para la emisión de luz visible.

La exterior cumple múltiples funciones:

- Proteger al tubo de descarga de corrientes de aire y cambios de temperatura exterior.
- Contener un gas inerte (generalmente nitrógeno) para prevenir la oxidación de las partes internas de la lámpara e incrementar la tensión de ruptura a través del bulbo.
- Proveer una superficie interna que actúe de soporte para el recubrimiento de fósforo.
- Actuar como filtro para quitar de la radiación emitida ciertas longitudes de onda no deseadas (ultravioleta-B y ultravioleta-C).

#### **2.1.5. Lámparas de mercurio de baja presión**

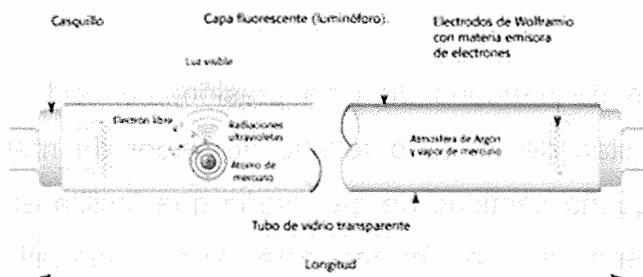
Las lámparas de mercurio de baja presión, conocidas como lámparas fluorescentes, constan de un tubo relleno de vapor de mercurio de a baja presión y una pequeña cantidad de gas argón que facilita el encendido. Este tubo, que puede tener diversas formas, está cerrado herméticamente en cada extremo con un casquillo donde se encuentran electrodos de wolframio impregnados en una pasta formada por óxidos alcalinotérreos, que tienen la función de emitir electrones.

Estas lámparas se caracterizan debido a que no tienen filamento, y los electrodos están separados sin conexión alguna, por lo que la corriente puede pasar solo a través del vapor existente en el interior del tubo. El funcionamiento de las lámparas fluorescentes puede verse sensiblemente afectado por diversos factores tales como temperatura y humedad ambiente, número de encendidos y tensión de alimentación. La máxima emisión luminosa de los fluorescentes se produce a temperaturas comprendidas entre 38 y 49 grados Celsius,

experimentando una pérdida de un 1 por ciento por cada grado de variación. Ello es debido a la enorme influencia que tiene la temperatura sobre la producción de rayos ultravioleta.

La presencia de aire húmedo en las proximidades de un tubo fluorescente puede formar una película de humedad sobre el mismo, variando la carga electrostática de la superficie del tubo y haciendo necesarias unas tensiones de arranque superiores a las normales. Este efecto puede eliminarse en gran parte disponiendo sobre la pared externa del tubo una delgada capa de silicona que dispersa la película de agua permitiendo el arranque en mejores condiciones.

Figura 5. **Lámpara de vapor de mercurio de baja presión**



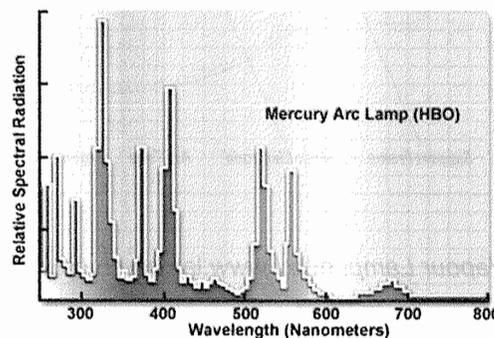
Fuente: Lámparas II. <http://www.ilighting.es/2011/01/lamparas-ii-lamparas-de-fotorradiacion.html>  
Consulta: octubre de 2012.

### 2.1.6. **Lámparas de mercurio de alta presión**

La presión del mercurio dentro de la ampolla en estas lámparas se encuentra dentro del rango de 5 – 10 atmósferas (4 000 – 8 000 milímetros de mercurio). En estas lámparas, se disipa gran cantidad de energía como calor, aunque parezca que la eficacia es mayor con el aumento de la presión.

Con las altas presiones del vapor de mercurio, ya no se generan únicamente radiaciones ultravioleta, también se emite radiación visible en distintas bandas correspondientes a las sensaciones de color violeta, azul, verde y amarillo.

Figura 6. **Espectro de emisión de las lámparas de alta presión**



Fuente: MORTIMER, Abramowitz. Light Sources.

<http://www.olympusmicro.com/primer/anatomy/sources.html>.

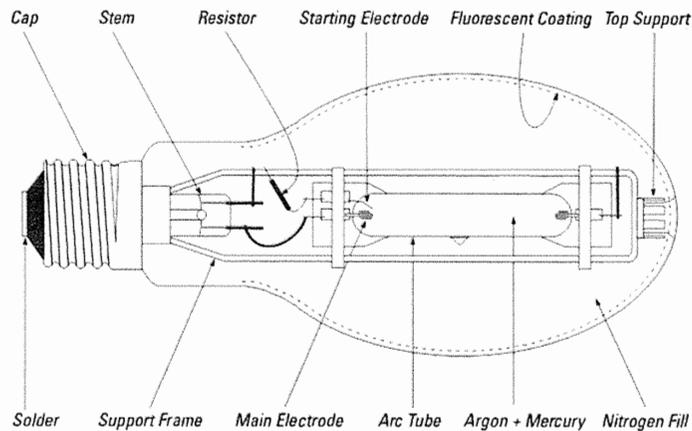
Consulta: octubre de 2012.

Las cualidades de la radiación producida por el mercurio no resultan buenas, principalmente por la ausencia de radiaciones rojas. Cuando la radiación ultravioleta se transforma, mediante el fósforo, en radiación comprendida dentro del espectro rojo, se logra una lámpara con un mejor rendimiento cromático.

### **2.1.7. Componentes de las lámparas de alta presión**

En la siguiente figura, se muestran todos los componentes de las lámparas de mercurio a alta presión, siguiente a ello, se tiene una explicación breve de las partes de mayor importancia.

Figura 7. **Componentes de las lámparas de mercurio**



Fuente: *The Mercury Vapour Lamp*. <http://www.lampstech.co.ukp>. Consulta: octubre de 2012.

### 2.1.7.1. **Tubo de descarga**

En esta ampolla se encuentra contenido el vapor de mercurio, así como los electrodos de tungsteno que permiten el paso de corriente para formar el arco de luz. Con el tiempo de funcionamiento los electrodos se evaporan lentamente y se depositan en la pared interior de la ampolla.

### 2.1.7.2. **Ampolla de vidrio de borosilicato**

Este bulbo está recubierto internamente con una capa fina de fósforo fluorescente, el cual convierte la radiación ultravioleta en visible, donde la emisión de mercurio es débil. Además, de ofrecer protección y equilibrio térmico a la ampolla en su interior. Se llena con nitrógeno o una mezcla nitrógeno-argón, incluso, con dióxido de carbono, lo que permite prevenir la oxidación de los selladores del arco de tubo para disminuir la velocidad de deterioro del fósforo.

### **2.1.7.3. Balastro**

Es un dispositivo que sirve para limitar la corriente que atraviesa la lámpara y evitar así un exceso de electrones circulando por el gas, lo cual aumentaría el valor de la corriente hasta producir la destrucción de la lámpara. Está formado por una bobina de hilo de cobre esmaltado con su correspondiente núcleo magnético. Este, va introducido dentro de un contenedor metálico, y todo ello impregnado al vacío con resinas capaces de penetrar hasta el interior de los más pequeños huecos existentes entre espiras; con ello conseguimos un considerable aumento de la rigidez dieléctrica de la bobina, una mejor disipación del calor formado, y una total eliminación de las posibles vibraciones del núcleo magnético.

### **2.1.7.4. Casquillo**

Su función es la fijación y sellado de la ampolla de vidrio a presión de vacío. Esta es la zona de la bombilla que encaja dentro del portalámparas. Está fabricado de aluminio niquelado que permite el paso de la electricidad para el funcionamiento de la lámpara.

### **2.1.7.5. Resistencia de arranque**

Sirve para conectar eléctricamente los electrodos en la etapa inicial de encendido de la lámpara. Es importante, ya que en esta etapa el flujo eléctrico entre los dos electrodos es muy bajo debido a la mínima cantidad de mercurio como vapor.

### 2.1.7.6. Soporte de montaje

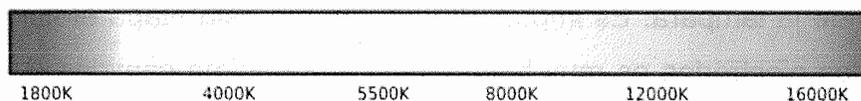
Base donde se monta el tubo de descarga con los electrodos, el balastro, los resistores, el vástago y los demás componentes, para mantener el espaciado y la altura requerida para no interferir con la luz emitida.

### 2.1.8. Datos característicos de las lámparas

Los datos característicos de las lámparas de mercurio, definen las propiedades específicas de cada modelo en particular. Los requerimientos de iluminación en un lugar o área establecen los parámetros de las lámparas que se utilizarán. Los datos característicos más relevantes son:

- Flujo luminoso: es el caudal de radiación visible por una fuente luminosa en una unidad de tiempo. Su unidad es el lumen.
- Potencia de la lámpara: potencia eléctrica consumida. Su unidad es el vatio.
- Temperatura de color: es el color de una fuente luminosa cuando se la compara con el que produce el cuerpo negro a esa misma temperatura. Se mide en grados Kelvin.

Figura 8. Temperatura del color



Fuente: GONZALES, Diego. Ergonomía y Psicología. p. 357.

- Vida útil: tiempo en horas hasta que la lámpara no alcanza alguno de los requisitos de prestaciones, tal como determinado valor del flujo luminoso, generalmente el 80 por ciento del flujo establecido inicialmente.
- Índice de reproducción cromática: define la veracidad con que se ve el color de los objetos. Se analiza la reproducción de los colores, permite comparar las características cromáticas de las fuentes de luz.
- Eficacia luminosa: se define como la relación entre el flujo luminoso de una fuente de luz y la potencia suministrada a ella.

Tabla I. **Comparación datos característicos entre lámparas de vapor de mercurio de baja y alta presión**

Parámetro a comparar	Tipo de lámparas	
	Mercurio baja presión	Mercurio alta presión
Apariencia color	Diferentes blancos	Blanco
Temperatura color	2 600 – 6 500 K	4 000 K
Reproducción cromática	Ra (50-95)	Ra (45)
Vida útil	10 000 h	16 000 h
Potencia	Variable	Variable
Flujo luminoso	Variable	Variable

Fuente: principales tipos de lámparas.

[http://www.unav.es/ted/manualted/manual\\_archivos/luz9\\_main.htm](http://www.unav.es/ted/manualted/manual_archivos/luz9_main.htm). Consulta: noviembre de 2012.

### 2.1.9. Características de manipulación

El contenido de mercurio, sustancia nociva para el ser humano, y la naturaleza de los materiales de los que están fabricadas las lámparas de alta

presión les confieren ciertas características físicas que se deben de considerar para su manipulación. Estas son:

- **Fragilidad:** están constituidas en su mayoría por vidrio de pocos milímetros de espesor, por lo tanto se trata de un producto frágil, lo que afecta considerablemente las condiciones de transporte y almacenamiento.
- **Contenido:** los constituyentes son de carácter nocivo, por lo tanto es necesario tomar precauciones durante su manipulación. Una rotura del recipiente provoca la fuga de los materiales truncando cualquier acción posterior sobre la lámpara.
- **Relación peso/volumen:** son elementos de poco peso en comparación con su volumen, lo que dificulta su transporte y almacenamiento.
- **Forma:** tienen múltiples formas y tamaños lo que no facilita su apilamiento.

#### **2.1.10. Factores que influyen sobre el funcionamiento**

La eficiencia de las lámparas de mercurio de alta presión, se ve afectada por una serie de factores que pueden aumentar el consumo energético, así como la emisión de la luz producida, estos son:

- **Temperatura ambiente:** las lámparas se construyen para que trabajen a temperaturas ambientes, es decir, entre -30 y 50 grados Celsius. Sin embargo, debido a que algunas disipan una gran cantidad de calor, su temperatura de trabajo puede ser mayor, este es el caso de lámparas dentro de luminarias cerradas.
- **Desviaciones de la tensión de red:** afecta a la tensión de la lámpara, la potencia, corriente y flujo luminoso.

- Número de encendidos: esto afecta a la eliminación de las sustancias emisoras que contienen los electrodos.
- Posición de funcionamiento: esto afecta la cantidad de luz entregada así como su vida útil.

### **2.1.11. Desechos generados**

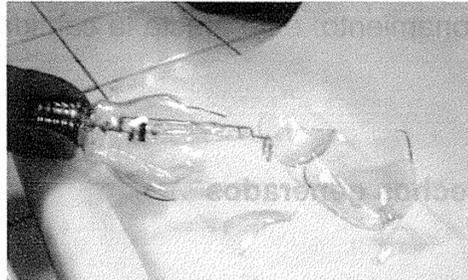
Las lámparas de mercurio al final de su vida útil, generan una variedad de desechos sólidos y líquidos, los cuales al ser dispuestos en los vertederos municipales conllevan a un gran impacto para el ambiente, no solo por la acumulación, sino también por los desechos tóxicos, principalmente el mercurio.

#### **2.1.11.1. Desechos sólidos**

Son definidos como aquellos cuerpos firmes no útiles después del cumplimiento de su vida útil en una actividad específica. En las lámparas de mercurio son todos aquellos componentes que quedan cuando ya no se cumplen los requerimientos de iluminación. A continuación se describen los materiales que representan el mayor volumen de desechos sólidos.

- Vidrio: la composición del vidrio es principalmente boro silicato y minerales, lo cual le da la posibilidad de ser altamente resistente al medio ambiente. El vidrio en sí mismo no constituye una amenaza para el medio ambiente porque es inerte, aunque no es biodegradable. Este desecho representa el mayor volumen de desecho generado.

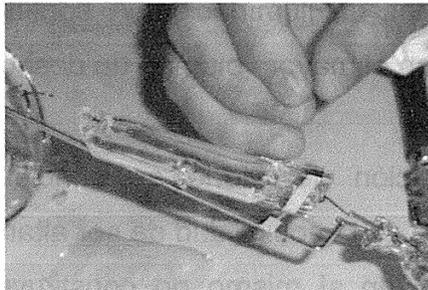
Figura 9. **Desecho de vidrio lámparas de mercurio**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Cuarzo: está compuesto de dióxido de silicio, en su forma de cristal de roca y sus propiedades lo hacen adecuado para su utilización en lámparas e instrumentos ópticos. En las lámparas el cuarzo es el material del que está fabricada la ampolla interna.

Figura 10. **Desechos cuarzo lámparas de mercurio**

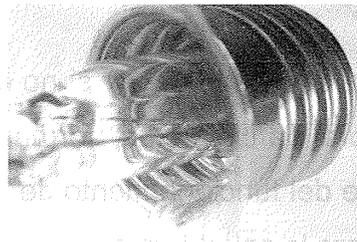


Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Aluminio: es uno de los metales de más utilización a nivel industrial, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como aleaciones y compuestos le permiten cumplir un sinnúmero de funciones. Debido a esta

gran utilidad y al impacto ambiental generado en su producción es muy importante recuperarlo y reciclarlo. En los desechos de las lámparas el aluminio es el metal del cual está constituido el casquillo.

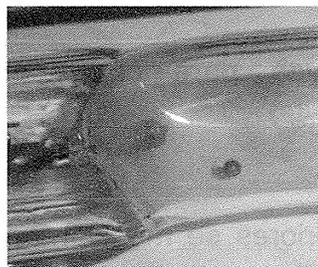
Figura 11. **Desecho de aluminio de lámparas de mercurio**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Tungsteno: es un metal escaso en la corteza terrestre, se encuentra en forma de óxido y de sales en ciertos minerales. Es de color gris acerado, muy duro y denso. Se usa en los electrodos de las lámparas, donde se produce el arco eléctrico.

Figura 12. **Desechos de tungsteno en lámparas de mercurio**



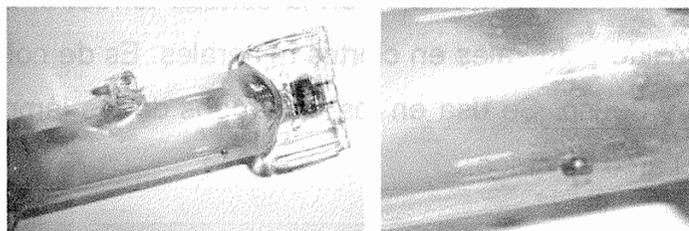
Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

### 2.1.11.2. Desechos líquidos

Estos desechos hacen referencia a cualquier sustancia o fluido líquido que queda después del periodo de vida útil de algún producto, al finalizar un proceso o una actividad. En los desechos de las lámparas de alta presión, únicamente el mercurio está presente en este estado fluido.

- Mercurio: a temperatura ambiente, y si no está encapsulado, el mercurio metálico se evapora parcialmente, formando vapores de mercurio. El mercurio es la base del funcionamiento de las lámparas de mercurio y es altamente tóxico para la salud humana y animal.

Figura 13. **Mercurio contenido en el tubo de descarga**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

### 2.1.12. Alternativas para el tratamiento de los desechos generados

En las secciones anteriores se mencionó que la cantidad de masa de desechos que se generan por las lámparas de descarga es alta. Conforme se van generando estos se acumulan en los vertederos y bodegas de almacenaje, siendo así como se ve afectado negativamente el ambiente. Por ello, existen distintas alternativas que permiten el tratamiento parcial o total de estos

desechos. Estas comparten el mismo objetivo y fin, la reducción del impacto ambiental negativo. Por ello, en los apartados siguientes se describen algunas de estas alternativas.

#### **2.1.12.1. Reciclaje de lámparas de mercurio de baja presión**

El equipo para el reciclaje incluye la separación de los componentes del tubo: vidrio, cabezales de aluminio, fósforo y mercurio. Consiste en un triturador, un separador, sistemas de filtración de partículas y vapor, así como cintas para el flujo de los materiales. Los diferentes materiales generados son derivados a un tratamiento posterior, reciclaje o disposición final. Un soplador industrial mantiene la presión negativa a lo largo de todo el proceso. El polvo se hace pasar a través de un sistema de filtros (que son automáticamente limpiados para evitar acumulación) y por último a través de un filtro de carbón activado antes de ser liberado a la atmósfera.

Trituración y separación: los tubos ingresan enteros al proceso, siendo la primera etapa la trituración del vidrio. Los componentes de la lámpara son separados y depositados en diferentes contenedores. Los cabezales de aluminio y el vidrio son analizados en cuanto a su contenido de mercurio y enviados a su reciclaje fuera del sitio. El polvo de fósforo es separado y enviado a un contenedor para su posterior tratamiento. Los filamentos son removidos por un separador magnético y enviados a reciclaje.

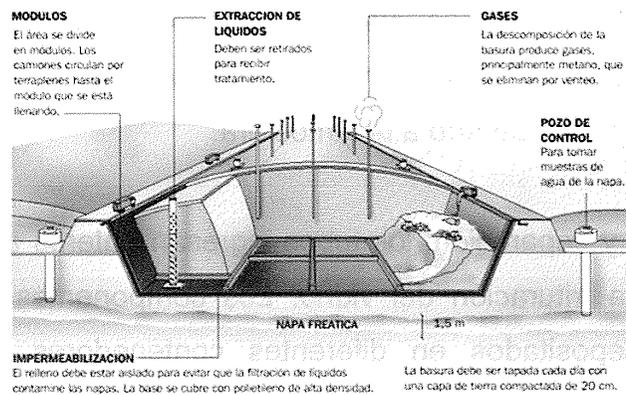
Unidad de recuperación térmica: el polvo separado es volcado al horno, donde por la aplicación de calor el mercurio es vaporizado y posteriormente condensado y enviado a un proceso de destilación. En este, el mercurio es

sometido a una triple destilación obteniendo mercurio técnicamente puro (99,99 por ciento de pureza).

### 2.1.12.2. Confinamiento en rellenos sanitarios de seguridad

Un relleno sanitario municipal es una obra de ingeniería destinada a la disposición final de los residuos sólidos, los cuales se disponen en el suelo, en condiciones controladas que minimizan los efectos adversos sobre el medio ambiente y el riesgo para la salud de la población.

Figura 14. Relleno sanitario de seguridad



Fuente: <http://www.laciudadviva.org/blogs/?p=9250> Consulta: octubre de 2012.

Estos pueden recibir residuos de tipo industrial peligroso los cuales son confinados de forma segura. La razón del seguimiento cuidadoso del residuo es por la capacidad de reaccionar unos con otros con la posibilidad de producir calor, combustión y/o vapores tóxicos. Es por ello que es necesario la deposición de los residuos peligrosos en celdas de seguridad. Estos rellenos tienen el mismo esquema de diseño una red de sistemas de drenaje de tuberías

para evacuar los lixiviados y geotextiles para evitar el ingreso de los contaminantes a la capa freática, adicionalmente tiene celdas de concreto armada reforzadas con planchas de acero.

### **2.1.12.3. Reciclaje de lámparas de descarga**

Separación de componentes: bajo una circulación de aire que mantiene la presión negativa, el globo externo del cristal se separa del vástago de la base y del metal de la lámpara que contiene el tubo interno del arco (que contiene el mercurio). Las partes que no contienen mercurio son separadas, clasificadas por tipo de material, testeadas en cuanto a su contenido de mercurio y enviadas a reciclaje.

Unidad térmica: el tubo interior se coloca en un horno donde es llevado a altas temperaturas, lo que ocasiona la vaporización del mercurio adherido al vidrio. El mercurio es enfriado y recogido para su procesamiento. El vidrio del tubo interior es enfriado, analizado y enviado a reciclaje.

Destilación: el mercurio crudo que se ha recuperado del proceso térmico es sometido a una destilación triple para quitarle impurezas, lo cual permite calificar al mercurio obtenido luego del proceso, como técnicamente puro.

## **2.2. Mercurio**

El mercurio es un elemento constitutivo de la tierra y se considera un metal pesado. Es el único metal líquido en su forma pura, y generalmente se encuentra en la naturaleza en compuestos y sales inorgánicas, en sus formas ionizadas mercuriosas (I) o mercúricas (II). Sus efectos sobre la salud y

ambiente están causando su sustitución tanto en procesos como en productos finales.

### **2.2.1. Propiedades fisicoquímicas**

El mercurio es el elemento químico identificado con el número atómico 80 y tiene un peso atómico 200,59 gramos, además, a temperatura ambiente es un metal brillante color plata y se encuentra en estado líquido. Su temperatura de fusión es de -38,9 grados Celsius, la de ebullición es 357,3 grados Celsius y 13,6 gramos por centímetro cúbico de peso específico a 0 grados Celsius.

La presión de vapor de mercurio es de 0,00129 milímetros de mercurio a 20 grados Celsius y esto provoca que se evapore fácilmente a temperatura ambiente; a 20 grados Celsius su concentración en el aire puede alcanzar hasta 0,014 gramos por metro cúbico, y hasta 2,4 gramos por metro cúbico a 100 grados Celsius.

El mercurio sólido no es buen conductor del calor, aunque es buen conductor de la electricidad. Es insoluble en agua. Cuando aumenta su temperatura por encima de los 40 grados Celsius produce vapores tóxicos y corrosivos, más pesados que el aire. Reacciona por oxidación con el ácido nítrico concentrado, el acetileno, el amoníaco y el cloro.

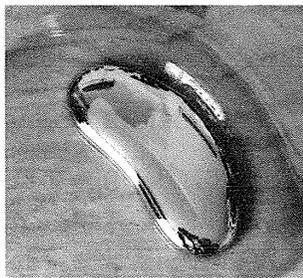
### **2.2.2. Usos y aplicaciones**

Los compuestos de plomo más utilizados en la industria son los óxidos de plomo, el tetraetilo de plomo y los silicatos de plomo. Todas las aleaciones formadas con estaño, cobre, arsénico, antimonio, bismuto, cadmio y sodio tienen importancia industrial.

El uso mayor del plomo es para la fabricación de los acumuladores para automóviles, siendo alrededor del 71 por ciento destinado para ello. Otras aplicaciones de importancia son:

- Forros protectores de cables
- Materiales de construcción
- Material de soldadura
- Pigmentos sintéticos
- Combustibles
- Refinación del petróleo
- Aplicaciones anticorrosivas
- Protección contra radiaciones
- Aplicaciones técnicas o artísticas

Figura 15. **Mercurio metálico**



Fuente: <http://quimicaparatodos.blogcindario.com>. Consulta: noviembre de 2012.

### **2.2.3. Ciclo del mercurio en el ambiente**

La corteza terrestre contiene un promedio de aproximadamente 0,02 partes por millón de mercurio. El aire contiene 0,005 - 0,06 nanogramos por metro cúbico, el agua dulce 0,1 miligramos por litro, el agua del mar 0,03

miligramos por litro de mercurio. Existen aproximadamente 20 minerales que contienen mercurio y otros que lo contienen como elemento traza, es contenido en casi todo tipo de rocas volcánicas.

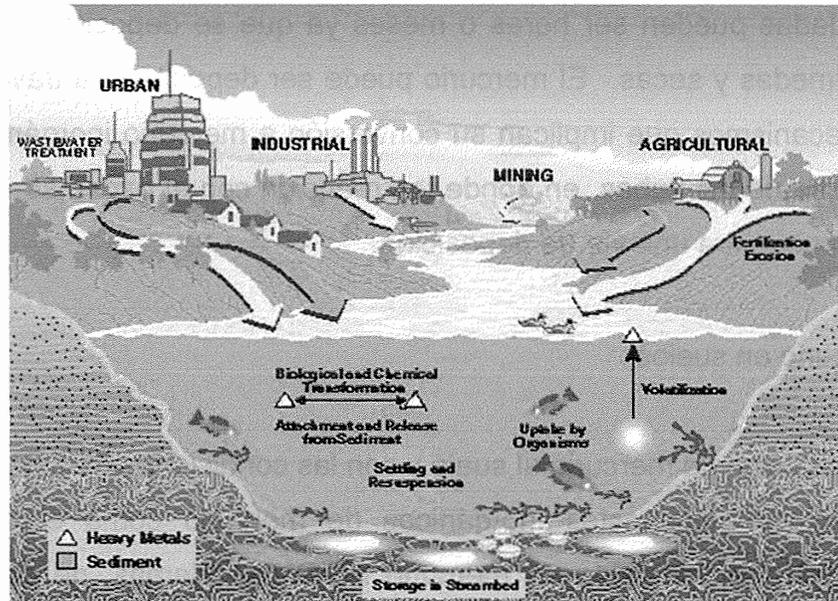
Se define como ciclo del mercurio el flujo continuo de mercurio en la atmósfera, la biosfera y agua. Está basado en el comportamiento que tiene el mercurio en los diferentes medios, en las reacciones químicas implicadas, así como en parámetros de transporte y destino. El ciclo del mercurio en la naturaleza está marcado por dos procesos, estos son:

- El transporte del mercurio por la atmósfera, la circulación del mismo procedente del interior de la tierra a través de los volcanes y los océanos.
- Segundo, es más específico y local, se representa por la transformación del elemento entre las diversas formas iónicas.

Se estima que los océanos son las mayores reservas de mercurio, alrededor de  $10^{17}$  gramos de mercurio, como sulfuro. Las aguas oceánicas contendrían alrededor de  $10^{13}$  gramos, la misma cantidad que suelos y sedimentos conjuntamente, la biosfera, principalmente en forma de biota terrestre, contendría  $10^{11}$  gramos;  $10^8$  gramos la atmósfera y  $10^7$  gramos las aguas terrestres.

La presencia antropogénica ha afectado la cantidad de mercurio en el medio ambiente, se ha determinado que de las 200 000 toneladas de mercurio emitidas a la atmósfera desde 1890, aproximadamente el 95 por ciento se encuentran en suelos terrestres, alrededor de un 3 por ciento en aguas oceánicas y un 2 por ciento en la atmósfera. También se estima que entre el 40 y el 75 por ciento del mercurio atmosférico actual tiene como origen fuentes producidas por el hombre.

Figura 16. Ciclo del mercurio en el ambiente



Fuente: PNUMA, Cadmio, plomo y mercurio: efectos en la salud humana y el ambiente en América Latina y el Caribe. Consulta: noviembre de 2012.

- Mercurio en la atmósfera

El destino del mercurio en la atmósfera se produce por las emisiones, las cuales pueden ser naturales o antropogénicas. Las primeras, se basan en la volatilización desde medios acuáticos y marinos, a de la vegetación y de la liberación de gases de materiales geológicos, así como las emisiones volcánicas. Las emisiones son de mercurio elemental. Las emisiones antropogénicas se basan en los procesos industriales y las fuentes de combustión de contenido variable en mercurio, encontrándose este como elemental pero también en sus formas oxidadas.

La permanencia varía en función de la forma en que se encuentre el mercurio, en su forma elemental permanece en promedio un año, y en las formas oxidadas pueden ser horas o meses ya que se deposita con facilidad por vías húmedas y secas. El mercurio puede ser depositado a través de una serie de mecanismos que implican su conversión a mercurio inorgánico en las gotas de agua de las nubes, en donde, en reacción con el ozono se oxida y de esta forma encuentra una vía de deposición.

- Mercurio en suelos

La deposición de mercurio al suelo y con las condiciones de este, permiten la formación de compuestos inorgánicos de mercurio como el cloruro de mercurio  $\text{HgCl}_2$  el hidróxido de mercurio  $\text{Hg}(\text{OH})_2$ , además, de compuestos inorgánicos acomplejados con aniones orgánicos. Estos compuestos inorgánicos tienden a formar complejos con la materia orgánica y arcillas de los suelos, por lo que se limita la movilidad del mercurio provocando acumulación en el área.

Otra especie del mercurio presente debido a los procesos microbianos es el metilmercurio. Siendo este uno de los compuestos de gran toxicidad y capacidad para bioacumularse. También se acompleja con la materia orgánica por lo que se limita su transporte en el ciclo del mercurio.

- Mercurio en aguas terrestres

La deposición del mercurio y sus especies puede ser directamente desde la atmósfera o también por la lluvia, en donde por el lavado y arrastre desde el suelo llegan a los cuerpos de agua a partir de corrientes de agua subterránea. Una parte del mercurio oxidado entra al sistema acuático, siempre que exista

una concentración alta de materia orgánica disuelta. La mayor parte del mercurio elemental pasa a la atmósfera por volatilización, la otra permanece en fase sólida.

- **Mercurio en ambientes marinos**

En las aguas costeras se tendría una mayor concentración por especies reactivas de mercurio liberados por fuentes antropogénicas cercanas, además la descarga acuática puede ser la fuente principal de contaminación, y por lo tanto se tiene mayor concentración en la atmósfera, creando un ambiente contaminado y deteriorando el ecosistema del lugar.

Los flujos de mercurio desde las aguas costeras son la sedimentación del mercurio, flujo hacia el océano y la evaporación a la atmósfera. En estas zonas, tanto el mercurio como el metilmercurio presentan acumulación en las cadenas alimenticias.

En las aguas oceánicas, el mercurio llega por deposición desde la atmósfera o bien por flujo desde las aguas costeras hacia la fase mixta superior, desde esa capa, el mercurio reactivo es transportado hacia zonas más profundas donde se da la reacción de metilación y las partículas que contenían al mercurio se degradan, liberándolo en el agua.

#### **2.2.4. Toxicología**

La toxicidad del mercurio depende de su forma química y, por lo tanto, los síntomas y signos varían según se trate de exposición de mercurio elemental, de compuestos inorgánicos, o de compuestos orgánicos.

#### **2.2.4.1. Mercurio elemental**

La inhalación de vapor de mercurio es la ruta más importante de penetración del mercurio elemental en el cuerpo humano. Aproximadamente 80 por ciento del mercurio vapor inhalado es retenido por el organismo. Una vez absorbido, el mercurio elemental es distribuido con facilidad por todo el cuerpo; es capaz de atravesar las barreras sangre-placenta y sangre-cerebro. Este es oxidado a mercurio inorgánico divalente vía hidrógeno peroxidasa - catalasa, presente en la mayoría de tejidos. La distribución del mercurio elemental absorbido se encuentra limitada principalmente por la oxidación a mercurio divalente, puesto que este último tiene una movilidad más reducida.

La intoxicación vía cutánea, es muy probable, el mercurio metálico puede atravesar la piel. Aunque puede que esta no represente un impacto tan alto como la inhalación e ingestión mencionadas anteriormente.

#### **2.2.4.2. Metilmercurio**

El metilmercurio se forma naturalmente (a partir del mercurio de liberaciones androgénicas y naturales) por la actividad biológica que tiene lugar en medios acuáticos. Se biomagnifica en la cadena alimentaria, apareciendo en concentraciones mucho más altas en mamíferos y peces superiores depredadores que en el agua y organismos inferiores. La mayor parte de las concentraciones de mercurio total en los peces se encuentra en forma de metilmercurio.

El mercurio metálico es escasamente absorbido por ingestión, La absorción en humanos de compuestos inorgánicos de mercurio presentes en alimentos se estima alrededor del 15 por ciento de media. Sin embargo, el

metilmercurio ingerido en la dieta es adsorbido en su totalidad y vertido al torrente sanguíneo. El transporte y penetración de metilmercurio en los diferentes tejidos se encuentran facilitados por la formación de un complejo de metilmercurio y cisteína.

### **2.2.5. Efectos en la salud humana**

El mercurio tiene un número de efectos sobre los humanos, estos pueden explicarse como:

- Daño al sistema nervioso
- Daño a las funciones del cerebro
- Daño al ADN y cromosomas
- Reacciones alérgicas, irritación de la piel, cansancio, y dolor de cabeza
- Efectos negativos en la reproducción, daño en el esperma, defectos de nacimientos y abortos

La inhalación prolongada de vapores de mercurio puede dar lugar a dolores de pecho, disnea (dificultad en la respiración), hemoptisis (expulsión de sangre por los pulmones) y en algunas ocasiones neumonitis intersticial que da lugar a la muerte.

La ingestión de compuestos mercúricos, puede causar gastroenteritis ulcerosa y necrosis tubular aguda causando la muerte por anuria (ausencia de micción) en caso de no realizarse diálisis.

El sistema central nervioso es el órgano crítico en la exposición a vapores de mercurio. La exposición aguda da lugar a reacciones psicóticas caracterizadas por delirios, alucinaciones y tendencias suicidas. El riñón es el

órgano afectado en el caso de ingestión de sales de mercurio inorgánico divalente, pudiéndose desarrollar síndromes nefríticos (enfermedades renales) como resultado de una respuesta inmuno tóxica.

El metilmercurio, afecta el sistema nervioso. La visión y la audición, así como aquellas regiones cerebrales relacionadas con la coordinación, son las funciones más afectadas. Los primeros efectos de la intoxicación son síntomas no específicos como parestesia (sensación de hormigueo), malestar y visión borrosa. En dosis altas, el metilmercurio afecta al sistema nervioso periférico dando lugar a síntomas de debilidad neuromuscular. Hay que remarcar además que en casos de intoxicación crónica, estos síntomas son irreversibles debido a la destrucción de células neuronales.

#### **2.2.6. Efecto en el medio ambiente**

Un factor muy importante de los efectos del mercurio en el medio ambiente es su capacidad para acumularse en organismos y ascender por la cadena alimentaria. Hasta cierto punto, todas las formas de mercurio pueden llegar a acumularse, pero el metilmercurio se absorbe y acumula más que otras formas.

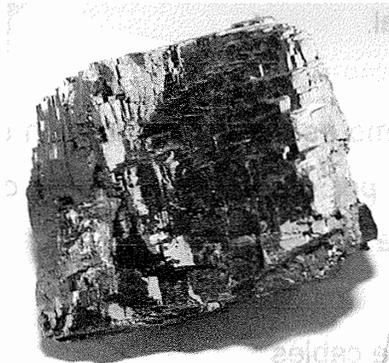
La biomagnificación del mercurio es lo que más incide en los efectos para animales y seres humanos. Al parecer, los peces adhieren con fuerza el metilmercurio; casi el 100 por ciento del mercurio que se bioacumula en peces es metilmercurio.

### 2.3. Plomo

El plomo es un elemento químico cuyo símbolo es Pb y número atómico es 82, es un metal pesado tóxico. El plomo rara vez se encuentra en su estado elemental, el mineral más común es el sulfuro, la galeana. Los otros minerales de importancia comercial son el carbonato, cerusita, y el sulfato, anglesita, que son mucho más raros. También se encuentra plomo en varios minerales de uranio y de torio, ya que proviene directamente de la desintegración radiactiva.

El plomo es anfótero, ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico. Tiene la capacidad de formar muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos. El plomo forma aleaciones con muchos metales, y, en general, se emplea en esta forma en la mayor parte de sus aplicaciones.

Figura 17. Plomo elemental



Fuente: minerales. <http://cienciasdelatierra2010.blogspot.com/2009/05/minerales.html>

Consulta: diciembre de 2012.

### **2.3.1. Propiedades fisicoquímicas**

El plomo es un metal gris azulado, se empaña para adquirir un color gris mate, se encuentra en la naturaleza en estado sólido. Es inelástico, maleable y dúctil. El plomo tiene una masa atómica 207,19 gramos por mol, densidad 11,4 gramos por mililitro a 16 grados Celsius. El punto de fusión es de 327 grados Celsius (600,61 Kelvin) y el de ebullición de 1 749 grados Celsius (2 022 K).

Las valencias químicas normales son 2 y 4. Es relativamente resistente al ataque de ácido sulfúrico y ácido clorhídrico y se oxida con ácido nítrico y ante la presencia de bases nitrogenadas.

### **2.3.2. Usos y aplicaciones**

Los compuestos de plomo más utilizados en la industria son los óxidos de plomo, el tetraetilo de plomo y los silicatos de plomo. Todas las aleaciones formadas con estaño, cobre, arsénico, antimonio, bismuto, cadmio y sodio tienen importancia industrial.

El uso mayor del plomo es para la fabricación de los acumuladores para automóviles, siendo el 71 por ciento, aproximado, destinado para ello. Otras aplicaciones de importancia son:

- Forros protectores de cables
- Materiales de construcción
- Material de soldadura, pigmentos sintéticos
- Combustibles, refinación del petróleo
- Aplicaciones anticorrosivas
- Protección contra radiaciones

### **2.3.3. Efectos en la salud humana**

Aunque el mecanismo de intoxicación del plomo no es conocido, se han identificado sus efectos de mayor relevancia para la salud humana los que se mencionan a continuación.

Sobre el tejido hematopoyético, el plomo bloquea varias enzimas para la síntesis del grupo Hem de la hemoglobina. La concentración de plomo en la médula ósea es importante, ya que altera la maduración de los glóbulos rojos. La fragilidad mecánica de los glóbulos rojos parece aumentar, y la vida media de estos disminuye ligeramente.

Los efectos en el sistema nervioso lo clasifican como un neurotóxico periférico y central. En el sistema periférico se ha establecido que a niveles de Pb-B inferiores a 60 microgramos por 100 mililitros puede existir un enlentecimiento de la velocidad de conducción del impulso nervioso. En el sistema central se dice que los efectos son no evidentes o limitados a reducción de rendimientos globales o alteraciones en las funciones psíquicas complejas.

El plomo también tiene efectos a nivel renal tras exposiciones prolongadas al metal. Iniciando con una excreción elevada de plomo, tras varios años de exposición se dejan de formar las inclusiones intranucleares en las células tubulares e inicial la fibrosis intersticial. Para finalizar con una nefritis crónica.

Otro factor de gran importancia es la capacidad del plomo de ser transmitido por transferencia placentaria en mujeres embarazadas, por lo que el feto puede exponerse a concentraciones tan altas como las de la madre. Produce abortos espontáneos, aumento de la tasa morbi-mortalidad en recién

nacidos. En el hombre se ha diagnosticado hipoespermia que está asociada con los abortos de igual manera.

A nivel del sistema cardiovascular también produce afecciones cardiovasculares, hipertensión arterial por afectación renal primaria, aumento de las resistencias periféricas por alteración de la pared de los vasos sanguíneos y por infiltración celular en el tejido específico de conducción. En trabajadores expuestos a mercurio se determinó que existe mayor riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares.

En animales se ha demostrado que el plomo produce cáncer, y se demostró el aumento significativo para varios tipos de cáncer.

#### **2.3.4. Efectos en el medio ambiente**

Las fuentes más comunes de emisión de plomo que contaminan la atmósfera, el suelo y los cursos de agua son aquellas que involucran a los procesos industriales que utilizan plomo o productos que lo contienen y las naftas adicionadas de tetraetilo de plomo. La principal contaminación ambiental se debe a compuestos inorgánicos de plomo.

Las principales fuentes de emisión al aire son la combustión de la gasolina con aditivos de plomo y las fundiciones de plomo. Esto debe controlarse ya que el plomo puede inhalarse y absorberse fácilmente. En el agua el plomo puede alcanzarse por los efluentes de industrias que utilizan subproductos del plomo para sus procesos, el nivel de contaminación es menor así como el de exposición esto se debe a la formación de carbonatos y sulfatos los cuales son compuestos insolubles en el agua. El suelo es contaminado por depósitos de partículas en el aire y agua contaminada.

## 2.4. Tungsteno (Wolframio)

El tungsteno, conocido como el wolframio o volframio, es un elemento químico con número atómico 74, su símbolo es W. Es un metal escaso en la corteza terrestre, se encuentra en forma de óxido y de sales en ciertos minerales, pero nunca como metal puro.

Este elemento ocupa el puesto 57 en la clasificación de elementos más abundantes de la corteza terrestre. No se encuentra nunca libre en la naturaleza, sino en forma de sales combinado con otros elementos, principalmente como la scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ) y la wolframita ( $(\text{Fe}, \text{Mn}) \text{WO}_4$ ), que son sus minerales más importantes. El wolframio natural es una mezcla de cinco isótopos estables. Además se conocen 21 isótopos inestables.

Figura 18. Tungsteno



Fuente: Tungsteno. <http://seguridadehigiene2010.blogspot.com/2010/06/toxicologia-tungsteno.html>. Consulta: diciembre de 2012.

### **2.4.1. Propiedades fisicoquímicas**

El tungsteno es un metal gris. Como metal en forma pura, tiene el punto de fusión más alto 3 410 grados Celsius (3 683,15 Kelvin) y la menor presión de vapor a temperaturas por encima de 1 650 grados Celsius, con valores inferiores de 4,27 pascal. Su punto de ebullición es de 5 555 grados Celsius (5828 Kelvin) y su densidad de 19,25 gramos por centímetro cúbico.

El tungsteno es inerte a las reacciones redox, resiste ataques de ácidos y álcalis, reacciona con mezcla de ácidos nítrico y fluorhídrico. Es atacado con las sales oxidantes fundidas, como el nitrito de sodio. El cloro, el bromo, el yodo, el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y el azufre todos en estado gaseoso reaccionan con tungsteno a altas temperaturas. El carbono, el boro, el silicio y el nitrógeno también forman compuestos únicamente a temperaturas elevadas. El estado de valencia más común en el que se encuentra es +6, pero presenta todos los estados de oxidación, desde -2 hasta +6.

### **2.4.2. Usos y aplicaciones**

El 40 por ciento del tungsteno obtenido de la explotación minera es utilizado en aleaciones ferrosas debido a la mejora de la dureza y fuerza del hierro y el acero, siendo esta la aplicación de mayor importancia. Siendo estas aleaciones los mejores materiales para herramientas duras, además, que retiene sus propiedades a altas temperaturas.

El tungsteno metálico puro en alambre, barra y lámina tiene gran aplicación en la industria eléctrica, es utilizado para filamentos de lámparas eléctricas, tubos electrónicos, para la técnica de evaporación de metales, se

utiliza como blanco de rayos X, bobinas y en la industria aeronáutica. Los wolframatos de calcio y magnesio son utilizados para luces fluorescentes.

El carburo de wolframio se utiliza para trabajar con metales; corte, tornos, minería y petróleo, el disulfuro se utiliza como lubricante seco empleado a altas temperaturas y el trióxido se usa en pinturas y cerámica.

### **2.4.3. Efectos en la salud humana**

El tungsteno al entrar en contacto con el ser humano produce distintos tipos de irritación de acuerdo a la parte del organismo con que interactúe. Con la piel se forman costras y picores, mientras que en los ojos lagrimeo y enrojecimiento. Al inhalar el tungsteno causa irritación de los pulmones y de la membrana mucosa.

Cuando se tiene un contacto de larga duración o muy prolongado se ha descubierto que puede empeorar las afecciones, sin embargo, no se ha descubierto algún efecto crónico.

### **2.4.4. Efectos en el medio ambiente**

El tungsteno es un metal que no se espera tenga un efecto sobre el medio ambiente, sin embargo, se han realizado estudios en animales donde se ha descubierto que puede perjudicar el crecimiento de las plantas, causar problemas reproductivos en las lombrices y muerte prematura en algunos animales acuáticos.

El tungsteno ocurre naturalmente en el ambiente en forma de minerales, pero no en forma de metal puro. El tungsteno elemental no puede ser ni

manufacturado ni destruido químicamente, pero sí puede cambiar de forma en el ambiente. El tungsteno es liberado al aire en forma de polvo fino por la erosión natural. Las emisiones desde fábricas de metales duros también aumentan los niveles de tungsteno en el aire. Partículas muy pequeñas de polvo de tungsteno en el aire se depositan en el agua superficial, la superficie de plantas y el suelo por la gravedad.

El tungsteno en el agua se origina principalmente de la disolución del tungsteno de las rocas y el suelo en agua que corre sobre o a través de éstos. El tungsteno en el agua puede estar en forma soluble o insoluble. El tungsteno insoluble puede depositarse en el fondo en donde pasa a formar parte del sedimento. Sin embargo, algunos compuestos insolubles de tungsteno pueden permanecer suspendidos en el agua del océano durante muchos años, tardando tanto como 1 000 años para depositarse en el fondo.

## **2.5. Tratamiento térmico para la recuperación de mercurio metálico**

El mercurio contenido en los tubos de descarga de las lámparas a alta presión se encuentra depositado en las paredes del tubo de cuarzo y amalgamado en los electrodos de la lámpara de mercurio es por ello que es necesaria una técnica para su recuperación y obtención para su posterior tratamiento.

El tubo de descarga se coloca en una mufla donde alcanza altas temperaturas, por encima del punto de ebullición del mercurio, 357 grados Celsius, esto provoca la evaporización y separación del mercurio de los componentes en donde esta adherido.

Al finalizar el tratamiento de vaporización se debe de someter a un tratamiento de enfriamiento, en donde se lleva a temperaturas menores del punto de ebullición del mercurio, para la obtención de este y así proceder a tratarlo para su disposición final.

### **2.5.1. Mufla**

Es un tipo de horno compacto que posee elementos de calefacción en sus costados, los cuales están aislados con fibra de cerámica. Existen diferentes modelos que varían en el volumen de capacidad, el tipo de cámara y las temperaturas de trabajo, generalmente de 100 hasta 1 450 grados Celsius.

Principalmente, son utilizados en laboratorios para realizar análisis y ensayos de calcinamiento, residuos de ignición, tratamientos térmicos, procesos de control, desecar, entre otras funciones.

## **2.6. Amalgama**

Son mezclas de un metal y el mercurio, en donde la composición le confiere propiedades y características específicas que pueden utilizarse para distintas aplicaciones.

### **2.6.1. Aleaciones**

Las aleaciones son mezclas homogéneas de dos o más metales, o bien, pueden ser de uno o más metales con elementos no metálicos, como el carbón. Estas se encuentran constituidas por elementos metálicos en sus estados elementales, es decir, con estado de oxidación cero.

Cuando los componentes no tienen carácter metálico suelen hallarse en muy pequeña proporción, mientras que si únicamente se mezclan metales, estos pueden aparecer en proporciones similares.

### 2.6.2. Tipos de amalgamas

Las amalgamas son aleaciones constituidas por mercurio y uno o más metales, cuyas características están definidas por la composición de cada metal en la mezcla.

Las amalgamas pueden ser:

- Líquidas: cuando el metal en mayor proporción es el mercurio.
- Sólidas: cuando el metal o metales a los que está unido se encuentran en mayor proporción que el mercurio.

### 2.6.3. Propiedades

Es imposible generalizar las propiedades de las amalgamas ya que de acuerdo al metal con el cual se esté formando se van a distinguir. Además, dependen de la composición, del tamaño, forma y distribución de sus fases o microconstituyentes. La adición de un componente aunque sea en pequeñas proporciones, incluso menores al 1 por ciento pueden modificar intensamente las propiedades de los metales.

Las propiedades físicas y químicas son, similares a la de los metales constituyentes, en contraste con las propiedades mecánicas, como dureza, ductilidad, tenacidad las cuales pueden ser muy diferentes a las originales. Presentan una alta conductividad eléctrica y térmica, pero menores a las de los

metales puros. Generalmente son negras o blancas, brillantes y susceptibles a la cristalización.

Expuestas al aire, las amalgamas formadas por metales oxidables se alteran con facilidad, el calor las descompone volatilizándolo el mercurio. El ácido nítrico es capaz de oxidar el mercurio, incluso con los metales con que está unido, otras veces oxidando a los otros metales únicamente y separándolos como óxidos y finalmente con los metales inertes a este ácido, en donde hay eliminación de éstos a consecuencia de la oxidación del mercurio por el ácido nítrico.

#### **2.6.4. Clasificación amalgamas**

Cuando se producen las amalgamas, se pueden observar distintas fases, las cuales dependen de las condiciones del sistema a las que se encuentra expuesto. La clasificación de las amalgamas se presentan en los apartados siguientes.

- Homogéneas: cuando los metales están formados por una única fase.
- Mezclas: cuando estén constituidas por más de una fase. Toda parte visible al microscopio y que físicamente sea distinta de las demás se considera una fase. La estructura queda conformada por diferentes micro-constituyentes o fases, las cuales se describen a continuación.
  - Metales puros, se cristalizan separadamente, y cada cristal contiene un solo componente. En este caso la aleación llamada eutéctica es una mezcla íntima de cristales.

- Aleación intermedia o compuestos químicos: estos cristales están formados por compuestos químicos de los componentes donde no es posible distinguir separadamente los originales. Las fases de aleación intermedias que pueden darse son:
  - Compuestos intermetálicos: están formados por metales químicamente distintos, y su combinación obedecen a las reglas de la valencia química. Presentan enlaces fuertes (iónicos - covalentes) y sus propiedades son normalmente similares a las de los materiales no metálicos, como es poca ductilidad y conductividad eléctrica baja, cristalizando en estructuras complejas.
  - Compuestos intersticiales: como la palabra indica los átomos de estos elementos, que son de tamaño pequeño se sitúan en los huecos o intersticios de la red cristalina. Los compuestos intersticiales tienen un carácter netamente metálico, composición variable dentro de estrechos límites, puntos de fusión elevados y presentan gran dureza.

#### **2.6.5. Amalgamamiento y técnicas de obtención**

Es el procedimiento de formación de una aleación entre el mercurio y algún metal o metales en particular, siendo uno de los más innovadores su utilización para minimizar el impacto ambiental, mediante la inmovilización del mercurio, evitando su atomización y pérdida.

Básicamente, el metal, en polvo o en dimensiones menores, produce una solución líquida con el mercurio, únicamente a bajas concentraciones del metal.

Sin embargo cuando las cantidades de este aumentan comienzan a formarse fases sólidas que llevan al endurecimiento o al fraguado del material. Un aspecto importante es que el endurecimiento no se debe a un cambio en la temperatura (enfriamiento), sino por un cambio en la composición del sistema, es decir, aumento de la proporción del metal o metales agregados.

Algunas técnicas de amalgamamiento son exotérmicas, pero también pueden ser endotérmicas y entre estas se pueden mencionar:

- **Procesos de fusión:** los componentes se calientan en un horno a una temperatura superior a las de fusión, se logra una mezcla homogénea y posteriormente se reduce la temperatura hasta que solidifican de nuevo.
- **Electrólisis:** si el electrolito contiene en disolución cationes de los elementos que se quieren alear, con el paso de una corriente eléctrica dichos iones se depositarán sobre el cátodo.
- **Compresión:** mediante un proceso similar a la sintetización, se mezclan los materiales en forma de polvo o virutas, se aumenta la presión y se calienta la mezcla hasta temperaturas inferiores a la de fusión.
- **Implantación de iones:** el metal, colocado en una cámara de vacío, se disparan haces de iones de elementos para producir una capa de aleación fina y resistente sobre la superficie del metal.

#### **2.6.6. Amalgama de cobre**

Es la aleación producida entre mercurio líquido y cobre elemental. De acuerdo a la proporción másica de los dos componentes se tendrá el estado

físico de esta. Con el fin de inmovilizar el mercurio el componente en mayor proporción es el cobre, por lo que la amalgama adquiere un estado físico sólido.

El amalgamamiento se logra utilizando metales sin ningún tipo de procedimiento térmico o mecánico de estabilización de cargas.

#### **2.6.6.1. Procedimiento de amalgamamiento**

La amalgama se producirá con cobre reducido a su forma metálica justo antes de formarla. Esto se logra mediante la reacción redox entre el cobre oxidado ( $\text{Cu}^{+2}$ ), de una solución de sulfato de cobre pentahidratado, y zinc metálico. Como se explicó anteriormente, el mercurio está presente en el medio pero es inerte a reaccionar con alguno de los dos reactivos. El cobre metálico se deposita sobre el mercurio metálico y reacciona hasta formar la amalgama.

#### **2.6.6.2. Diagrama de fases sistema cobre-mercurio**

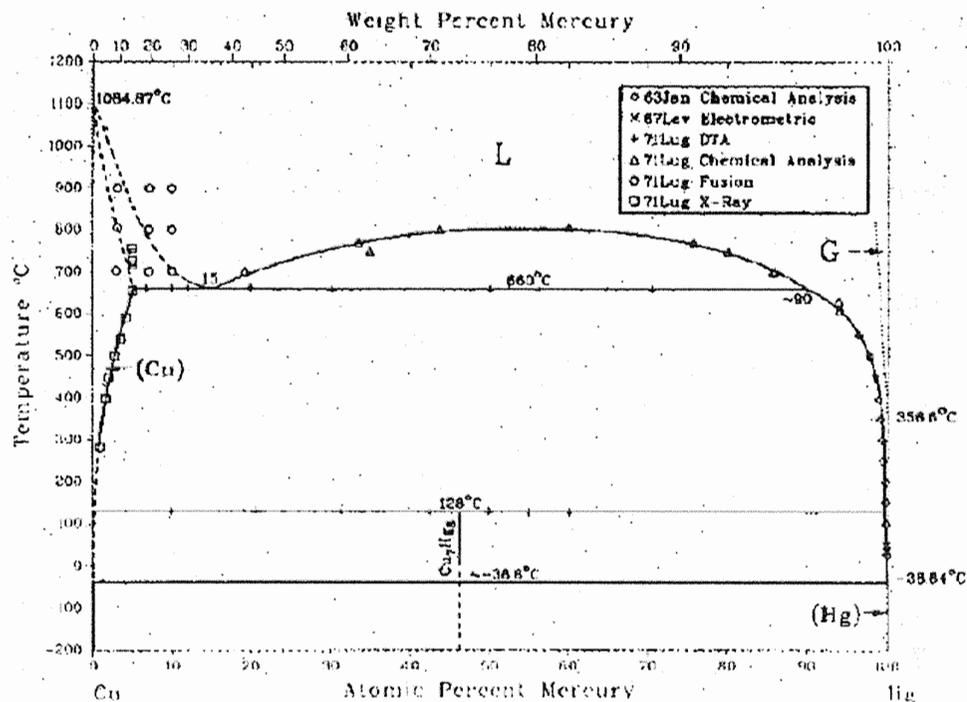
El diagrama de fases se caracteriza por la presencia de una larga región de inmiscibilidad en el líquido en la curva *liquidus* en el lado rico en mercurio. En el lado rico en cobre la solución sólida tiene una homogeneidad limitada que no posee la solución sólida de mercurio.

El diagrama de equilibrio anterior presenta las siguientes fases:

- El líquido L, que manifiesta una región de inmiscibilidad por debajo de 810 grados Celsius extendiéndose hasta 660 grados Celsius, desde 15 hasta 90 porcentaje másicos de mercurio.

- La solución sólida fcc, (Cu), se extiende desde 5 por ciento masa de mercurio a 660 grados Celsius.
- La solución sólida romboédrica, que es estable por debajo de 38,8 grados Celsius y tiene una solubilidad despreciable de cobre.
- La fase romboédrica intermedia, que se presume de proporción molar 7 a 6 cobre a mercurio, que se forma peritácticamente a 128 grados Celsius, la temperatura más baja de estabilidad no se conoce.

Figura 19. Diagrama de fases sistema cobre – mercurio



Fuente: CHAKRABARTI, Laughlin, *The Cu-Hg (Copper – Mercury) System*.

## 2.7. Reacciones redox

Estas corresponden a las reacciones de óxido reducción, las cuales ocurren mediante transferencia de electrones, consisten en dos reacciones simultáneas:

- Oxidación: se refiere a la pérdida o donación de uno o más electrones por parte de una especie durante el transcurso de una reacción.
- Reducción: se refiere a la ganancia de uno o más electrones por parte de una especie durante una reacción.

Estas reacciones implican metales de transición que tienen más de un estado estable de oxidación. El agente reductor, es la sustancia que reduce a la otra especie cuando esta se oxida y el agente oxidante es la sustancia que cuando se reduce causa la oxidación de la otra especie.

El fenómeno de reducción y oxidación es simultáneo, es decir que no pueden existir en forma aislada, por lo tanto se cumple con la ley de conservación de la energía.

$$\# e^{-} (\text{cedidos}) = \# e^{-} (\text{ganados})$$

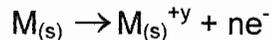
### 2.7.1. Hemirreacciones

La clave para lograr una mejor comprensión, así como el balance de las ecuaciones de las reacciones redox es pensar en los procesos de reducción y oxidación de manera individual, por lo que estos son divididos en hemirreacciones como se muestra a continuación.

### 2.7.1.1. Hemirreacción de oxidación

Se utiliza para mostrar la pérdida de electrones de la especie que se está oxidando en la reacción. En esta se determina y se establece el grado de oxidación que sufre el metal y el número de valencia con el que pertenece al finalizar la reacción.

Figura 20. Hemirreacción de oxidación



Fuente: ATKINS, Peter. Principios de química: los caminos de descubrimiento. p.445.

Donde **M** es un metal de transición, **y** es el número de oxidación del metal y **n** es el número de electrones cedidos.

La presentación de la hemirreacción es conceptual, los electrones no están libres en la realidad, es por ello que se expresa su estado porque estos están en tránsito y no tienen un estado físico definido.

### 2.7.1.2. Hemirreacción de reducción

Se muestra la ganancia de los electrones en la especie que se está reduciendo en la reacción, al analizar ambas hemirreacciones se debe de balancear la cantidad de electrones transferidos desde una a la otra.

Figura 21. **Hemirreacción de reducción**



Fuente: ATKINS, Peter. Principios de química: los caminos de descubrimiento. p.445

Donde **M** es un metal de transición, **y** es el número de oxidación y **n** es el número de electrones ganados.

Los electrones liberados por la especie que se oxida se transfieren directamente a los átomos de la especie que se reduce, nuevamente, la presencia de los electrones es únicamente en forma conceptual. Al tratarse de una reducción, se ganan electrones, es decir, cargas negativas, por lo que el número de oxidación de esta especie disminuye algebraicamente.

### 2.7.2. **Potencial de reducción**

Estos se definen como la capacidad que tiene un átomo, ión o molécula para reducirse u oxidarse. Cuando dos especies interactúan en una reacción redox, la diferencia entre sus respectivos potenciales, como valores normales, puede relacionarse con la constante de equilibrio para la reacción involucrada. Este diferencial es la fuerza que impulsa la transferencia de electrones.

La diferencia de potencial entre un electrodo, metal en estado elemental, y su solución, forma oxidada, no puede determinarse debido a la acumulación de carga en su interfase dentro de la celda. Es necesario establecer una conexión eléctrica externa y una de intercambio iónico interno entre una media celda y otra para que sea posible la medición de la diferencia de potencial entre las

medias celdas y es de esta manera como están constituidas las celdas electroquímicas.

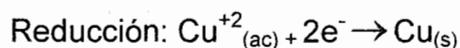
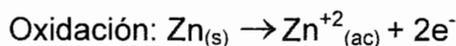
Para poder determinar el diferencial de potencial de cada media celda y por ende de la hemirreacción de los metales es necesario utilizar una media celda de referencia. Esta media celda se conoce como electrodo normal de hidrógeno al cual se le asigna un valor de 0,00 voltios.

### 2.7.3. Reacciones redox en la investigación

Son aquellas reacciones donde simultáneamente una especie se oxida y la otra se reduce al transferirse electrones entre ellas. Para completar los objetivos de la investigación se evaluaron diversas reacciones que permitieron el desarrollo del procedimiento de amalgamamiento con cobre.

- Reacción redox entre cobre oxidado ( $\text{Cu}^{+2}$ ) y zinc elemental para el procedimiento de amalgamamiento del mercurio recuperado

Es conocida como celda galvánica. Se requiere cobre elemental para formar la amalgama con el mercurio metálico recuperado de los tubos de descarga de las lámparas de mercurio a alta presión. El cobre elemental se producirá en una reacción redox entre sulfato de cobre pentahidratado y zinc elemental. Las semirreacciones involucradas son:



Los potenciales de reducción y oxidación para el sistema de media celda se describen a continuación.

$$E^{\circ}_{\text{Cu}^{+2}/\text{Cu}} = E^{\circ}_{\text{Cu}^{+2}/\text{Cu}} + \frac{0,059}{2} \log \frac{[\text{Cu}^{+2}]}{[\text{Cu}]} \quad E^{\circ}_{\text{Cu}^{+2}/\text{Cu}} = 0,34 \text{ V}$$

$$E^{\circ}_{\text{Zn}^{+2}/\text{Cu}} = E^{\circ}_{\text{Zn}^{+2}/\text{Cu}} + \frac{0,059}{2} \log \frac{[\text{Zn}^{+2}]}{[\text{Zn}]} \quad E^{\circ}_{\text{Zn}^{+2}/\text{Cu}} = 0,76 \text{ V}$$

De acuerdo a los potenciales de reducción y el de la celda, la reacción es espontánea, siendo este a 25 grados Celsius:

$$E^{\circ} = 1,1 \text{ voltios}$$

Conforme el zinc metálico se oxida en la solución de sulfato de cobre, los electrones se transfieren al cobre en estado +2 y este se reduce hasta su estado elemental. El trabajo eléctrico se continuará produciendo durante un tiempo, la concentración de  $[\text{Cu}^{+2}]$  disminuirá y aumentará la de  $[\text{Zn}^{+2}]$ , por lo que el potencial de oxidación deberá aumentar mientras que el de reducción disminuir, hasta que se alcance un equilibrio en los potenciales.

$$E^{\circ}_{\text{Zn}^{+2}/\text{Cu}} + \frac{0,059}{2} \log [\text{Zn}^{+2}]_{\text{eq}} = E^{\circ}_{\text{Cu}^{+2}/\text{Cu}} + \frac{0,059}{2} \log [\text{Cu}^{+2}]_{\text{eq}}$$

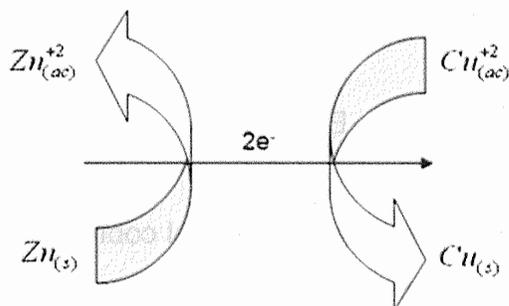
$$\frac{0,059}{2} \log \frac{[\text{Zn}^{+2}]_{\text{eq}}}{[\text{Cu}^{+2}]_{\text{eq}}} = E^{\circ}_{\text{Cu}^{+2}/\text{Cu}} - E^{\circ}_{\text{Zn}^{+2}/\text{Cu}}$$

De donde se obtiene que a 25 grados Celsius:

$$K_{\text{eq}} = \frac{[\text{Zn}^{+2}]_{\text{eq}}}{[\text{Cu}^{+2}]_{\text{eq}}} = 10^{37,4}$$

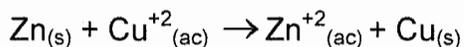
El valor de la constante de equilibrio  $K_{eq}=10^{37,4}$  establece un parámetro favorable para la reacción redox entre el cobre en su forma oxidada y el zinc metálico.

Figura 22. **Reacción redox entre cobre y zinc**



Fuente: elaboración propia.

La reacción redox global entre estas especies es:



La reacción redox entre el cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ) y el zinc metálico ( $\text{Zn}^0$ ) se realiza en presencia del mercurio, sin embargo, de acuerdo a los potenciales de reducción se puede observar que el mercurio no interactúa con ninguna de las especies en forma espontánea.



Entre el zinc metálico y el mercurio metálico no existe interacción o reacciones redox posibles debido a que ambas especies se encuentran en estado elemental.

Como la experimentación se realiza en la solución de sulfato de cobre, al agregar el mercurio recuperado, no reaccionará de acuerdo a los potenciales de reducción. El potencial de la reacción sería:

$$E^0 = -0,51 \text{ V}$$

La oxidación del mercurio y reducción del cobre +2 no es posible de forma espontánea. Debido a que el mercurio es una especie inerte en la reacción redox, no se tienen pérdidas de mercurio en sus formas oxidadas, por lo que la totalidad de la masa reacciona en el proceso de amalgamamiento.

- Reacción de zinc con ácido clorhídrico

En el procesamiento de amalgamamiento se formará la amalgama de cobre, sin embargo, la fase sólida también está constituida por el zinc en exceso, para la determinación de la masa que le corresponde, este se oxida con un lavado de ácido clorhídrico, ya que tanto el cobre como el mercurio son inertes a dicho ácido. El potencial de la reacción redox es 0,76 voltios.



La reacción global es:

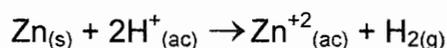
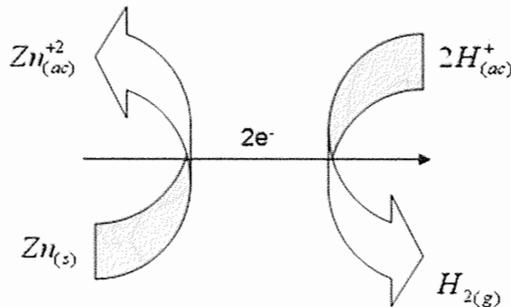


Figura 23. **Reacción redox de zinc con el ácido clorhídrico**

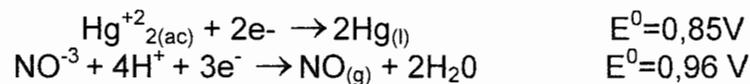


Fuente: elaboración propia.

- Reacciones redox para la evaluación del mercurio, plomo y tungsteno en el tubo de descarga.

Para la detección posterior al tratamiento térmico y verificar la residualidad del mercurio, plomo y tungsteno se realizará un ataque con ácido nítrico, como se observa a continuación las reacciones son espontáneas.

- Reacción redox mercurio metálico y ácido nítrico



El potencial de la reacción es 0,11 voltios, que indica su espontaneidad.

La reacción redox global es:

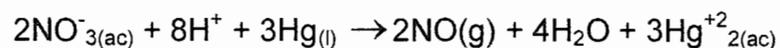
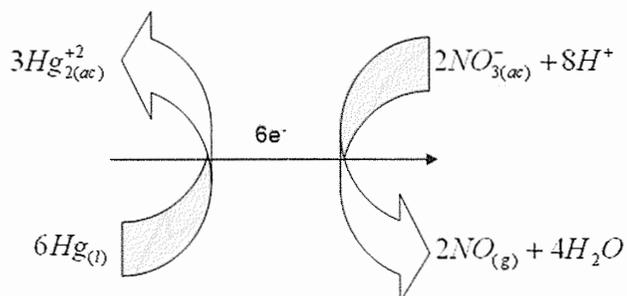


Figura 24. Reacción redox del ácido nítrico y el mercurio metálico



Fuente: elaboración propia.

- Reacción redox plomo y ácido nítrico

$\text{Pb}^{+2}_{(ac)} + 2e^{-} \rightarrow \text{Pb}(s)$	$E^0 = -0,13 \text{ V}$
$\text{NO}^{-3} + 4\text{H}^{+} + 3e^{-} \rightarrow \text{NO}_{(g)} + 2\text{H}_2\text{O}$	$E^0 = 0.96 \text{ V}$

El ácido nítrico oxida al plomo y se observa que la reacción es espontánea según el potencial de la reacción:

$$E^0 = 1,09 \text{ V}$$

La reacción redox global es:

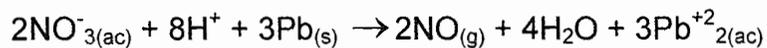
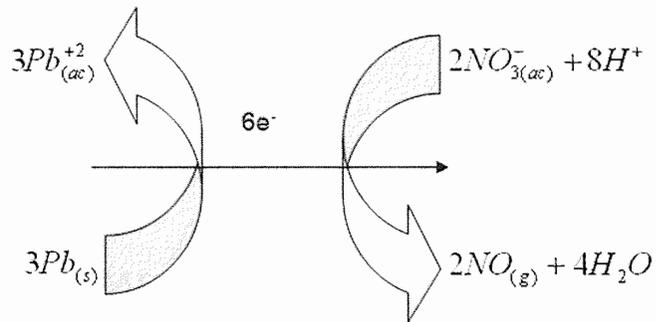
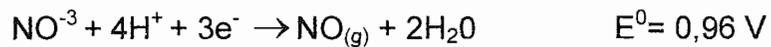
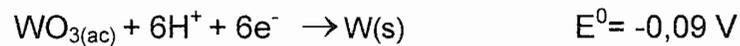


Figura 25. **Reacción redox del ácido nítrico y el plomo metálico**



Fuente: elaboración propia.

- Reacción redox de tungsteno y ácido nítrico



En el lavado con ácido nítrico el tungsteno reacciona y se oxida, la reacción es espontánea según el potencial de la reacción:

$$E^{\circ} = 1,05 \text{ V}$$

La reacción redox global es:

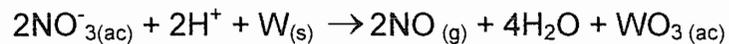
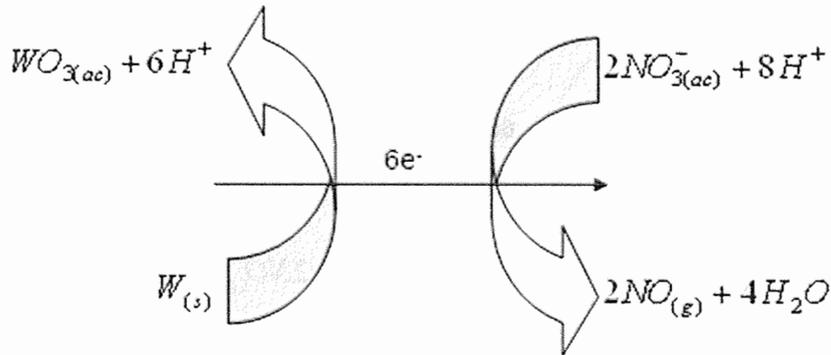


Figura 26. **Reacción redox del ácido nítrico y el tungsteno metálico**



Fuente: elaboración propia.

## 2.8. Técnicas instrumentales

Son procesos científicos fundamentales que han demostrado ser útiles para proporcionar información acerca de la composición de las sustancias. Juega un papel importante en todos los aspectos ya que proporciona los límites de detección más bajos requeridos en cualquier área de la industria. La espectroscopia, electroquímica y cromatografía son las áreas en las que se dividen las técnicas instrumentales.

### 2.8.1. Espectrometría de absorción atómica

Espectroscopia es la medición e interpretación de la radiación electromagnética absorbida, dispersada o emitida por átomos, moléculas u otras especies químicas. Estos fenómenos están asociados con cambios en los estados de energía de las diferentes especies. Por consiguiente, dado que cada especie posee estados energéticos característicos, la espectroscopia puede utilizarse para identificarlas y cuantificarlas.

La espectroscopia constituye la base del análisis espectro químico, en el que la interacción de la radiación electromagnética con la materia se utiliza para obtener información cualitativa y cuantitativa acerca de la composición de una muestra. Dentro del análisis espectro químico, la espectroscopia atómica estudia la absorción y emisión de la radiación por especies atómicas, iónicas y moleculares libres. Estas especies son generadas y examinadas en un medio gaseoso de alta energía, que constituye una fuente de vaporización, atomización, ionización y excitación.

#### **2.8.1.1. Fundamentos**

El átomo consiste de un núcleo y de un número determinado de electrones que llenan ciertos niveles cuánticos. La configuración electrónica más estable de un átomo corresponde a la de menor contenido energético conocido como "estado fundamental".

Si un átomo que se encuentra en un estado fundamental absorbe una determinada energía, éste experimenta una transición hacia un estado particular de mayor energía. Como este estado es inestable, el átomo regresa a su configuración inicial, emitiendo una radiación de una determinada frecuencia.

La frecuencia de la energía radiante emitida corresponde a la diferencia de energía entre el estado excitado ( $E_1$ ) y el estado fundamental ( $E_0$ ).

Según la teoría atómica, el átomo puede alcanzar diferentes estados ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , etc.), y de cada uno de ellos emitir una radiación ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , etc.), característica, obteniéndose así un espectro atómico, caracterizado por presentar un gran número de líneas discretas. En absorción atómica es relevante solamente aquella longitud de onda correspondiente a una transición

entre el estado fundamental de un átomo y el primer estado excitado y se conoce como longitud de onda de resonancia.

De la ecuación de Planck, se tiene que un átomo podrá absorber solamente radiación de una longitud de onda (frecuencia) específica. En absorción atómica interesa medir la absorción de esta radiación de resonancia al hacerla pasar a través de una población de átomos libres en estado fundamental. Estos absorberán parte de la radiación en forma proporcional a su concentración atómica.

La relación entre absorción y concentración se encuentra definida en la Ley de Lambert-Beer. Como la trayectoria de la radiación permanece constante y el coeficiente de absorción es característico para cada elemento, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbentes.

### **2.8.2. Fluorescencia de rayos X**

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una de las herramientas más potentes para la rápida determinación cuantitativa de todos los elementos, excepto los más ligeros, en muestras complejas, con la adecuada corrección de los efectos de la matriz.

Aunque es posible obtener un espectro de emisión de rayos X si se incorpora la muestra en la zona del blanco de un tubo de rayos X, esta técnica no es nada conveniente para muchos tipos de materiales. En su lugar, la excitación se consigue irradiando la muestra con un haz de rayos X procedente de un tubo de rayos X o de una fuente radiactiva. Con esta técnica, los elementos de la muestra se excitan como consecuencia de la absorción del haz

primario y emiten sus propios rayos X fluorescentes característicos. Por ello, se denomina de esa manera al método.

### **2.8.2.1. Fundamentos**

La técnica de Fluorescencia de Rayos X se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X.

Esta radiación, convenientemente colimada, incide sobre un cristal analizador (con espaciado interatómico  $d$ ) que la difracta en un ángulo ( $\theta$ ) dependiente de su longitud de onda ( $\lambda$ ) por la ley de Bragg ( $\text{sen } \theta = n\lambda/2d$ ). Un detector que puede moverse sobre un determinado rango de dicho ángulo mide el valor de la intensidad de radiación en un ángulo determinado y por tanto para una longitud de onda específica, que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra que produce tal radiación de fluorescencia.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Objeto, proceso o característica que está presente, o supuestamente presente, en el fenómeno que un científico quiere estudiar. Los objetos, procesos o características reciben el nombre de variables en la medida en que su modificación provoca una modificación en otro objeto, proceso o característica.

##### 3.1.1. Variables de control

Son todas las variables que representan las condiciones de las distintas fases experimentales en la investigación, esta integra las variables dependientes y las independientes.

Tabla II. Descripción de las variables de control

No.	Variable	Unidades	Factor Potencial de Diseño	
			Variable	Constante
<b>I. Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamientos térmicos</b>				
1	Temperatura tratamiento térmico	°C	x	
2	Tiempo de duración tratamiento	min	x	
3	Temperatura de enfriamiento	°C		x
4	Masa de mercurio metálico recuperado	mg	x	

Continuación de la tabla II.

<b>II. Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo)</b>				
5	Concentración ácido nítrico	M		x
6	Volumen ácido nítrico	mL		x
7	Volumen solución de lavados	mL		x
8	Masa de mercurio remanente	mg	x	
9	Masa de plomo remanente	mg	x	
10	Masa de tungsteno remanente	mg	x	
<b>III. Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento</b>				
<b>Evaluación de la reacción redox a dos fases entre cobre [Cu<sup>+2</sup>] y zinc (Zn<sup>0</sup>)</b>				
11	Proporción molar zinc:cobre	mol/mol	x	
12	Sulfato de cobre pentahidratado	M		x
13	Cobre inicial (Cu <sup>+2</sup> )	mol		x
14	Zinc metálico inicial (Zn <sup>0</sup> )	mg	x	
15	Cobre oxidado final (Cu <sup>+2</sup> )	mol	x	
16	Cobre reducido (Cu <sup>0</sup> )	mol	x	
17	Tiempo de reacción	min		x
<b>Evaluación de la proporción Cu:Hg para la formación de amalgama sólida</b>				
18	Proporción molar zinc:cobre	mol/mol		x
19	Proporción molar cobre:mercurio	mol/mol	x	
20	Masa mercurio inicial (Hg <sup>0</sup> )	mg		x
21	Conc. sulfato de cobre pentahidratado	M	x	
22	Cobre inicial (Cu <sup>+2</sup> )	mol	x	
23	Zinc metálico inicial (Zn <sup>0</sup> )	mg	x	
24	Amalgama de cobre (+/-)	mg	x	
25	Tiempo de reacción	min		x
<b>Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico</b>				
26	Masa mercurio inicial (Hg <sup>0</sup> )	mg		x
27	Proporción molar zinc:cobre	mol/mol		x
28	Proporción molar cobre:mercurio	mol/mol	x	

Continuación de la tabla II.

29	Absorbancia sol. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ inicial	--	x	
30	Concentración $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ inicial	M	x	
31	Cobre inicial ( $\text{Cu}^{+2}$ )	mol	x	
32	Masa zinc agregada	mg	x	
33	Absorbancia sol. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ final	--	x	
34	Concentración $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ final	M		x
35	Cobre final ( $\text{Cu}^{+2}$ )	mol	x	
36	Masa desecho (Amalgama + Zinc)	mg	x	
37	Zinc en exceso	mg	x	
38	Masa amalgama de cobre	mg	x	
39	Mercurio oxidado ( $\text{Hg}^{+2}$ )	mg	x	
40	Cobre amalgamado	mol	x	
41	Mercurio amalgamado	mol	x	
42	Proporción experimental Cu:Hg	mol/mol	x	
<b>IV. Determinación del porcentaje de mercurio metálico inmovilizado por amalgamamiento</b>				
43	Mercurio inicial	mg	x	
44	Mercurio oxidado no amalgamado	mg	x	
45	Mercurio amalgamado	mg	x	
46	% Mercurio tratado por inmovilización	%	x	
<b>V. Determinación mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento</b>				
47	Masa desecho	mg	x	
48	Zinc en exceso ( $\text{Zn}^0$ )	mg	x	
49	Amalgama de mercurio	mg	x	
50	Zinc agregado inicialmente	mg	x	
51	% Másico zinc en exceso en el procedimiento	%	x	
52	% Másico amalgama de cobre en desecho	%	x	
53	% Másico zinc en desecho	%	x	

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables independientes

En la etapa experimental, el investigador intenta reproducir artificialmente los fenómenos que desea comprender; cuando parte de un supuesto vínculo entre un objeto, proceso o característica (supuesta causa) y el objeto proceso o característica que exige una explicación (el efecto), manipula experimentalmente la primera para ver si se produce algún efecto. La variable que manipula el experimentador recibe el nombre de variable independiente.

Tabla III. Descripción de las variables independientes

No.	Variable	Unidades	Descripción
<b>I. Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamientos térmicos</b>			
1	Temperatura tratamiento térmico	°C	Temperatura en la mufla a las que se exponen las ampollas de cuarzo
2	Tiempo de tratamiento	min	Tiempo de duración de las ampollas en la mufla
3	Temperatura de enfriamiento	°C	Temperatura ambiente
<b>II. Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos</b>			
4	Concentración ácido nítrico	M	Concentración ácido nítrico comercial
5	Volumen ácido nítrico	mL	Volumen de ácido para lavado de ampollas
6	Volumen solución	mL	Soluciones para análisis de metales pesados por Fluorescencia Rayos X.
<b>III. Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento</b>			
<b>Evaluación de la reacción redox a dos fases entre cobre [Cu<sup>+2</sup>] y zinc (Zn<sup>0</sup>)</b>			
7	Proporción molar zinc:cobre	mol/mol	Proporciones molares que se evalúan para determinar % de reducción

Continuación de la tabla III.

8	Concentración $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	M	Solución saturada
9	Cobre inicial ( $\text{Cu}^{+2}$ )	mol	Moles disponibles de cobre
10	Zinc metálico inicial ( $\text{Zn}^0$ )	mg	Masa correspondiente a las proporciones
11	Tiempo de reacción	min	Tiempo estándar para las corridas.
<b>Evaluación de la proporción cobre – mercurio para la formación de amalgama sólida</b>			
12	Proporción molar zinc:cobre	mol/mol	Proporción mínima de evaluación.
13	Proporción molar cobre:mercurio	mol/mol	Proporciones de 1:1, 2:1, 3:1 y 4:1
14	Masa mercurio inicial ( $\text{Hg}^0$ )	mg	Masa de gota de mercurio estándar
15	Concentración $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	M	Concentraciones variables
16	Cobre inicial ( $\text{Cu}^{+2}$ )	mol	Moles de cobre disponibles
17	Zinc metálico inicial ( $\text{Zn}^0$ )	mg	Masa que corresponde a cada proporción.
18	Tiempo de reacción	min	Tiempo estándar de la reacción
<b>Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico</b>			
19	Masa mercurio inicial ( $\text{Hg}^0$ )	mg	Masa correspondiente a la masa de una gota estándar
20	Proporción molar zinc:cobre	mol/mol	Proporción seleccionada
21	Proporción molar Cu:Hg	mol/mol	Proporción seleccionada
22	Absorbancia sol. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ inicial	---	Medición de la absorbancia con el color del complejo
23	Concentración $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ inicial	M	Utilización de curva de calibración
24	Cobre inicial ( $\text{Cu}^{+2}$ )	mol	Cobre disponible para reaccionar
25	Masa zinc agregada	mg	Masa de zinc agregada de acuerdo a proporción.
<b>IV. Determinación del porcentaje de mercurio metálico inmovilizado por amalgamamiento</b>			
26	Mercurio inicial	mg	Masa correspondiente a la masa de una gota de mercurio
27	Mercurio remanente en solución	mg	Mercurio oxidado en el amalgamado.
28	Mercurio amalgamado	mg	Mercurio tratado por amalgamamiento

Continuación de la tabla III.

<b>V. Determinación mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento</b>			
29	Masa desecho	mg	Desecho generado en el proceso de amalgamamiento con cobre
30	Zinc elemental en desecho	mg	Zinc contenido en el desecho del amalgamamiento
31	Amalgama de mercurio	mg	Amalgama de cobre contenido en el desecho generado
32	Zinc elemental agregado en el procedimiento.	mg	Zinc agregado según proporción zinc: cobre.

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3. Variables dependientes

El objeto, proceso o característica a estudiar y que modifica su estado con la modificación de la variable independiente (es decir que depende de ella y que en esa medida es un efecto) se llama variable dependiente.

Tabla IV. Descripción de las variables dependientes

No.	Variable	Unidades	Descripción
<b>I. Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamientos térmicos</b>			
1	Masa de mercurio metálico recuperado	mg	Masa de mercurio recuperada por el tratamiento térmico
<b>II. Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos</b>			
2	Mercurio remanente	mg	Masa de mercurio recuperada por oxidación con ácido nítrico.

Continuación de la tabla IV.

3	Plomo	mg	Masa de plomo detectada
4	Tungsteno	mg	Masa de tungsteno detectada
<b>III. Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento</b>			
<b>Evaluación de la reacción redox a dos fases entre cobre [Cu<sup>+2</sup>] y zinc (Zn<sup>0</sup>)</b>			
5	Cobre oxidado final (Cu <sup>+2</sup> )	mol	Moles de cobre que no se redujeron en la redox
6	Cobre reducido (Cu <sup>0</sup> )	mol	Moles reducidos del total disponible.
<b>Evaluación de la proporción Cu:Hg para la formación de amalgama sólida</b>			
7	Amalgama de cobre (+/-)	mg	Detección de amalgama de cobre sólida
<b>Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico</b>			
8	Absorbancia sol. CuSO <sub>4</sub> *5H <sub>2</sub> O final	---	Absorbancia de la solución al finalizar la reacción y el amalgamamiento.
9	Concentración CuSO <sub>4</sub> *5H <sub>2</sub> O final	M	Obtenida de la curva de calibración
10	Cobre final (Cu <sup>+2</sup> )	mol	Moles de cobre que no se redujeron
11	Masa desecho (Amalgama + Zinc)	mg	Masa obtenida al finalizar el procedimiento de amalgama.
12	Zinc en exceso	mg	Masa de zinc lavada con HCl.
13	Masa amalgama de cobre	mg	Masa residual después de lavar el desecho con ácido clorhídrico
14	Mercurio oxidado (Hg <sup>+2</sup> )	mg	Mercurio determinado por absorción atómica posterior al amalgamamiento.
15	Cobre amalgamado	mol	Cobre reducido
16	Mercurio amalgamado	mol	Mercurio amalgamado del total disponible
17	Proporción experimental Cu <sub>x</sub> Hg <sub>y</sub>	mol/mol	Proporción experimental de la amalgama de cobre
<b>IV. Determinación del porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento</b>			
18	Porcentaje mercurio tratado por inmovilización	%	Cantidad de mercurio que se inmovilizó

Continuación de la tabla IV.

<b>V. Determinación mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento</b>			
19	Porcentaje en masa de zinc en exceso	%	Cantidad de zinc en exceso
20	Porcentaje en masa de zinc en el desecho	%	Masa de zinc en el desecho del procedimiento
21	Porcentaje en masa de amalgama de cobre en el desecho	%	Masa de amalgama de cobre en el desecho del procedimiento

Fuente: elaboración propia.

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

Consiste en la etapa de enfocar los términos concretos del campo de interés, establecer y especificar los alcances y los límites. Con ello, se reduce el problema inicial a dimensiones prácticas dentro de las cuales se puede realizar la investigación.

- Área: química ambiental.
- Industria: iluminación pública.
- Proceso: recuperación y tratamiento de los desechos de mercurio.
- Ubicación: los desechos del alumbrado público que se evaluaron pertenecían al municipio de Mixco, Guatemala. La metodología de recuperación y tratamiento de mercurio se ejecutó en el Laboratorio de Análisis Físicoquímicos de la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

### **3.3. Recurso humano disponible**

El recurso humano en toda investigación es importante, ya que representan los aportes intelectuales así como físicos para la elaboración de la investigación. En esta investigación el recurso humano consistió en todo el equipo de investigación del proyecto FODECYT 19-2010.

- Investigador: Br. Héctor Rolando Méndez Rossal
- Asesor: Ph.D. Casta Zeceña Zeceña
- Co-asesor: M.Sc. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Los recursos materiales fueron todos aquellos equipos, reactivos, cristalería y la infraestructura de los que se dispone para el desarrollo de toda la investigación. Estos se detallan a continuación.

#### **3.4.1. Localización**

La metodología experimental se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Análisis Físicoquímicos del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### **3.4.2. Materiales (desechos)**

Los materiales que se evaluaron, fueron los desechos del alumbrado público del municipio de Mixco, Guatemala. Específicamente, el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) donde está contenido el mercurio.

Figura 27. **Desechos del alumbrado público (tubos de descarga)**



Fuente: bodega de almacenamiento de los desechos de la Municipalidad de Mixco.

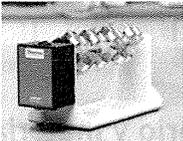
### 3.4.3. **Equipo**

Son todos los bienes tangibles disponibles para la realización de la investigación y que cumplen funciones específicas. Estos proporcionan las condiciones necesarias para la evaluación de los fenómenos así como para la medición de las variables estudiadas.

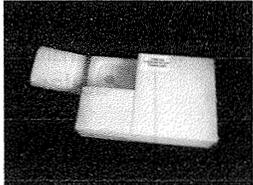
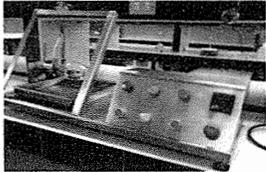
Tabla V. **Descripción del equipo**

<b>Equipo</b>	<b>Marca/ Modelo</b>	<b>Investigación</b>
<p data-bbox="370 1486 610 1514"><b>Balanza analítica</b></p>  <p data-bbox="297 1755 686 1843">Fuente: <a href="http://www.radwag.com/spanish/images/ps1_b.jpg">http://www.radwag.com/spanish/images/ps1_b.jpg</a> Consulta: 31 de octubre de 2012.</p>	<p data-bbox="789 1598 922 1759">Marca RADWAG Modelo WPS 750/C/1</p>	<p data-bbox="992 1566 1235 1793">Medición de la masa de reactivos, mercurio recuperado por calcinación y el amalgama producido.</p>

Continuación de la tabla V.

<p style="text-align: center;"><b>Mufla</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.</p>	<p>Fischer Scientific</p>	<p>Utilizada en el tratamiento térmico de las ampollas para la recuperación del mercurio.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Rotador orbital</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.</p>	<p>Thermolyn Labline</p>	<p>Agitación de recipientes de ensayo de la técnica de amalgamamiento.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Agitador rotativo</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: <a href="https://www.fishersci.ca/images/F79277~wl.jpg">https://www.fishersci.ca/ images/F79277~wl.jpg</a> Consulta: 2 de noviembre de 2012</p>	<p>Thermolyn Labline</p>	<p>Agitación de tubos de ensayo durante la evaluación de la técnica de tratamiento de amalgamamiento.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Fotómetro</b></p>  <p style="text-align: center;">Fuente: <a href="http://mibio.ru/pictures/126/pic1_28092012091204.jpg">http://mibio.ru/pictures/ 126/pic1_28092012091204.jpg</a> Consulta: 2 de noviembre de 2012.</p>	<p>Spectroquant, NOVA 60</p>	<p>Determinación de concentración del cobre en las soluciones analizadas al final de la reacción REDOX.</p>

Continuación de la tabla V.

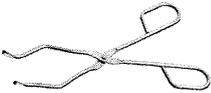
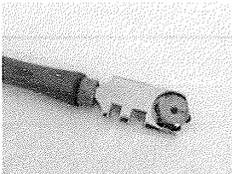
<p><b>Equipo de Apertura de Ampollas</b></p>  <p>Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.</p>	<p>Proyecto FODECYT 19- 2010</p>	<p>Apertura de las ampollas de cuarzo, recuperación de mercurio.</p>
<p><b>Equipo de Apertura de Lámparas</b></p>  <p>Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.</p>	<p>Proyecto FODECYT 19- 2010</p>	<p>Apertura de las ampollas de cuarzo, recuperación de mercurio.</p>

Fuente: elaboración propia.

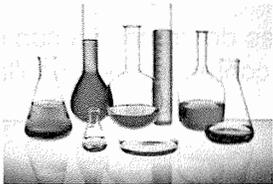
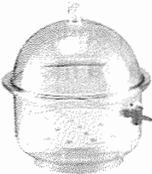
#### **3.4.4. Cristalería, equipo de laboratorio y materiales**

Son todos los accesorios, cristalería y materiales que permiten la realización de la fase experimental. Con ellos, generalmente, se manipulan todas las muestras y procesos a nivel de laboratorio. Son indispensables para simular el proceso estudiado a escala.

Tabla VI. **Cristalería, equipo de laboratorio y materiales**

<b>Equipo</b>	<b>Investigación</b>
<p data-bbox="483 474 732 506"><b>Pinzas para crisol</b></p>  <p data-bbox="354 674 865 764">Fuente: <a href="http://www.navasdistribuciones.com/showimage.php?id=IF365">http://www.navasdistribuciones.com/showimage.php?id=IF365</a>. Consulta: 2 de noviembre de 2012.</p>	<p data-bbox="911 590 1369 684">Para el manejo de los crisoles en donde se colocan las ampollas con mercurio para la calcinación.</p>
<p data-bbox="456 800 760 831"><b>Crisoles de porcelana</b></p>  <p data-bbox="399 1020 821 1110">Fuente: <a href="http://www.ictsl.net/images/2047crhc015006_462.jpg">http://www.ictsl.net/images/2047crhc015006_462.jpg</a>. Consulta: 2 de noviembre de 2012.</p>	<p data-bbox="902 926 1382 1020">Crisoles de porcelana con capacidad para contener tres ampollas dentro de la mufla.</p>
<p data-bbox="480 1142 740 1173"><b>Cortador de Vidrio</b></p>  <p data-bbox="362 1419 857 1509">Fuente: <a href="http://i00.i.aliimg.com/img/pb/453/878/384/384878453_196.JPG">http://i00.i.aliimg.com/img/pb/453/878/384/384878453_196.JPG</a>. Consulta: 2 de noviembre de 2012</p>	<p data-bbox="914 1293 1369 1388">Colocación de las ampollas de cuarzo en el equipo de apertura de ampolla, para marcar la ampolla.</p>
<p data-bbox="488 1543 732 1575"><b>Espátula cuchara</b></p>  <p data-bbox="370 1707 849 1797">Fuente: <a href="http://www.ibdciencia.com/1063-thickbox/espátula-cuchara-doble.jpg">http://www.ibdciencia.com/1063-thickbox/espátula-cuchara-doble.jpg</a>. Consulta: 2 de noviembre de 2012.</p>	<p data-bbox="906 1640 1377 1734">Espátula cuchara para la manipulación de la gota de mercurio recuperada.</p>

Continuación de la tabla VI.

<p><b>Tubo de ensayo</b></p>  <p>Fuente: <a href="http://oriflamezapopan.mex.tl/images/24983/tubos%20de%20ensayo.bmp">http://oriflamezapopan.mex.tl/images/24983/tubos%20de%20ensayo.bmp</a>. Consulta: 2 de noviembre de 2012.</p>	<p>Para el tratamiento del mercurio por amalgamamiento.</p>
<p><b>Cristalería</b></p>  <p>Fuente: <a href="http://0.tqn.com/d/chemistry/1/0/E/1/1/chemistry-glassware.jpg">http://0.tqn.com/d/chemistry/1/0/E/1/1/chemistry-glassware.jpg</a>. Consulta: 2 de noviembre de 2012.</p>	<p>Recipientes para la preparación de soluciones, manipulación de las especies reactivas y para contener los reactivos. Distintas capacidades. Evaluación redox y amalgamamiento.</p>
<p><b>Desecadora</b></p>  <p>Fuente: <a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Desecador">http://es.wikipedia.org/wiki/Desecador</a>. Consulta: 2 de noviembre de 2012.</p>	<p>Secado del filtrado del amalgama de cobre.</p>

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.5. Reactivos

Son todos los compuestos y sustancias químicas utilizadas para el estudio de los fenómenos analizados en la investigación. En este caso son todas las especies requeridas para la detección de los metales y el estudio del proceso de amalgamamiento con cobre.

- Sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
- Zinc metálico ( $\text{Zn}^0$ )
- Ácido Nítrico ( $\text{HNO}_3$ )
- Ácido Clorhídrico ( $\text{HCl}$ )

### 3.5. Técnica cuantitativa

Comprende todas las técnicas utilizadas para la medición y la cuantificación de las variables de interés, en esta investigación las técnicas cuantitativas representan etapas simples como tomar un peso, así como las técnicas instrumentales mencionadas anteriormente.

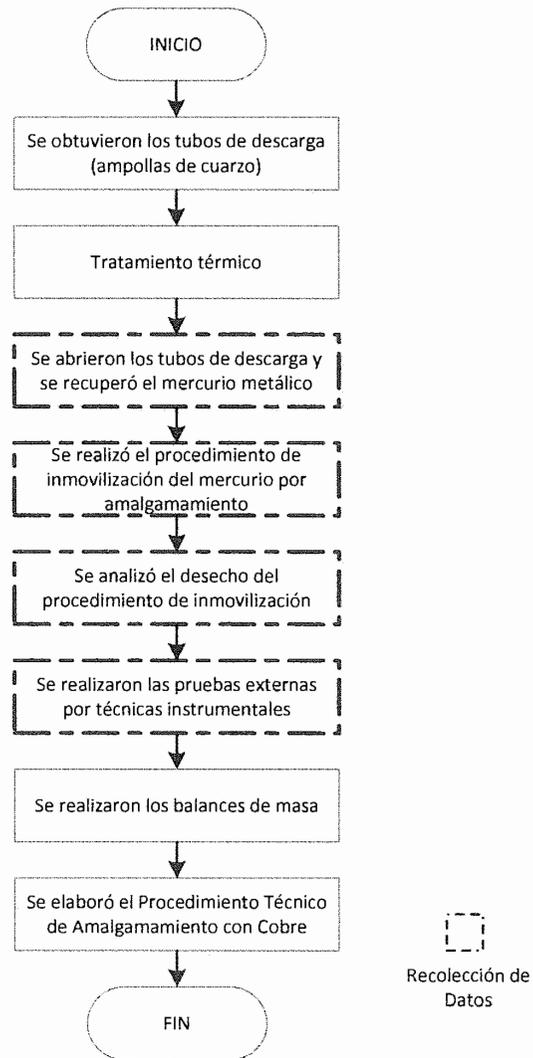
- Masa mercurio recuperado por tratamiento térmico a altas temperaturas del tubo de descarga (tara): determinación de la masa de mercurio que se obtuvo en función de la temperatura y del tiempo del tratamiento térmico en la mufla.
- Espectrometría de Absorción Atómica: esta técnica se utilizó para la cuantificación del mercurio remanente después del tratamiento térmico en los tubos de descarga (ampolla de cuarzo), también se detectó el mercurio oxidado en el procedimiento de amalgamamiento.

- Fluorescencia de rayos X: esta técnica se utilizó para la detección del plomo y tungsteno en el tubo de descarga después de la recuperación del mercurio por tratamiento térmico.
- Fotometría: se determinó la concentración de cobre como sulfato al inicio y final de la reacción con zinc metálico utilizando la coloración que presenta dicho complejo.
- Porcentaje de rendimiento de la reducción del cobre: para la evaluación de la reacción redox entre el zinc metálico y el sulfato de cobre, se tararon las masas de los metales precipitados, luego se lavó con ácido clorhídrico y se determinó la diferencia de masa que corresponde al zinc elemental, y el remanente, el cobre elemental.

### **3.6. Recolección de la información**

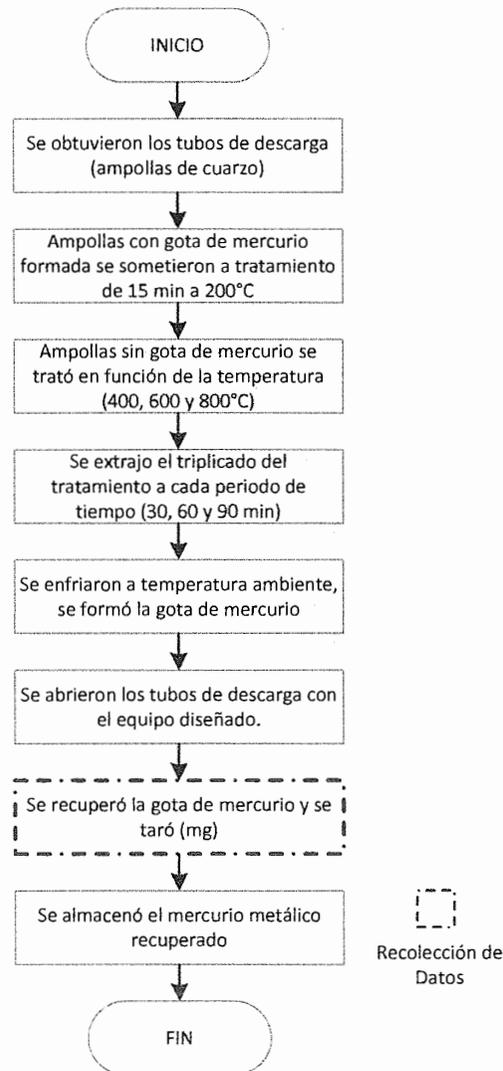
La recolección de la información, consiste en la obtención y medición de las variables requeridas en cada una de las etapas de la investigación. Este apartado explica gráficamente el procedimiento de la toma de datos en el trabajo de investigación.

Figura 28. **Recuperación y tratamiento del mercurio de los desechos de las lámparas de alta presión**



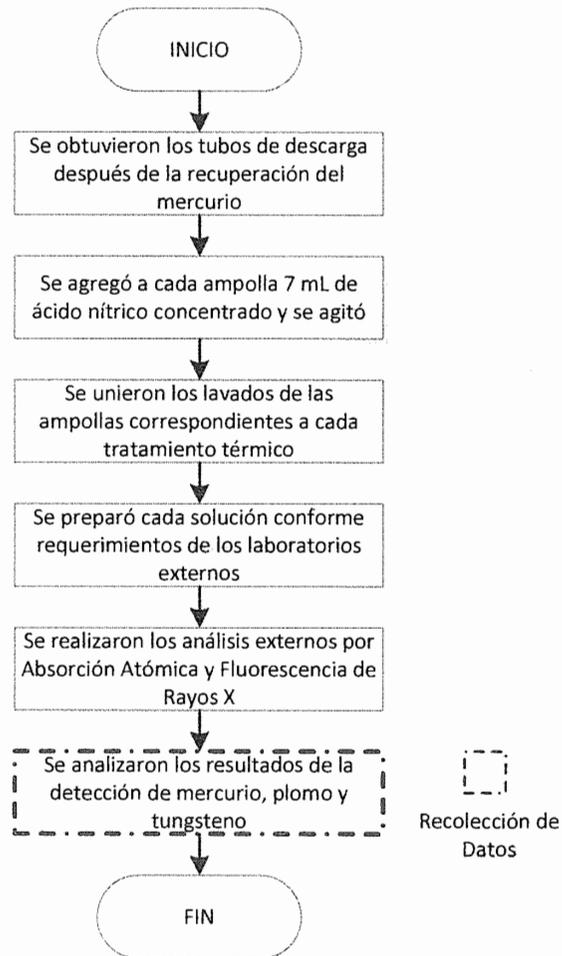
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga mediante tratamientos térmicos



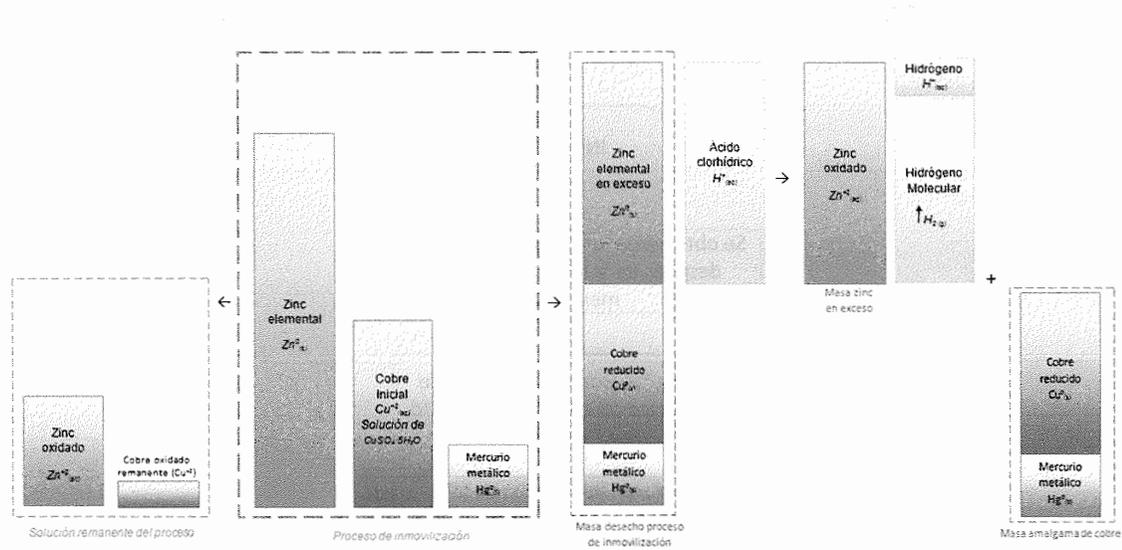
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga posterior a los tratamientos térmicos**



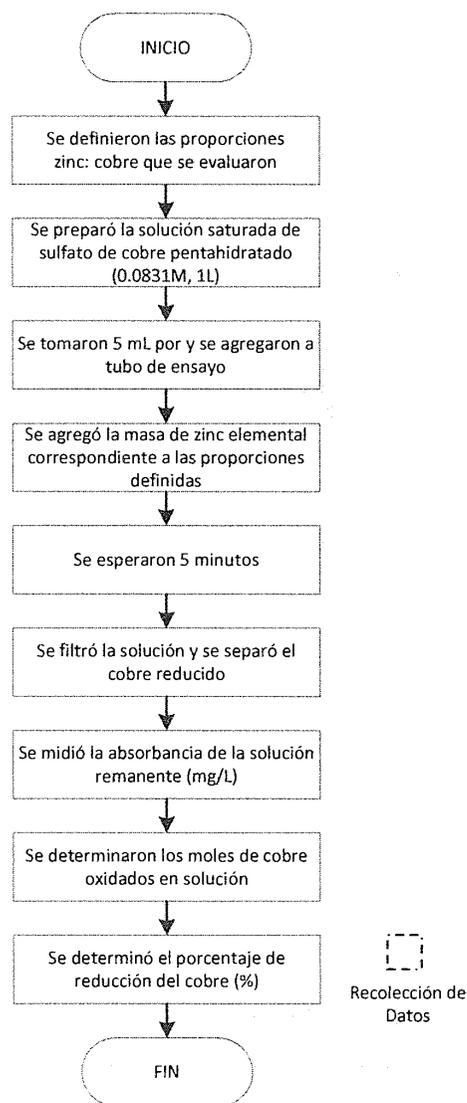
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Balance de masa de las especies reactivas en el proceso de inmovilización mediante procedimiento de amalgamamiento



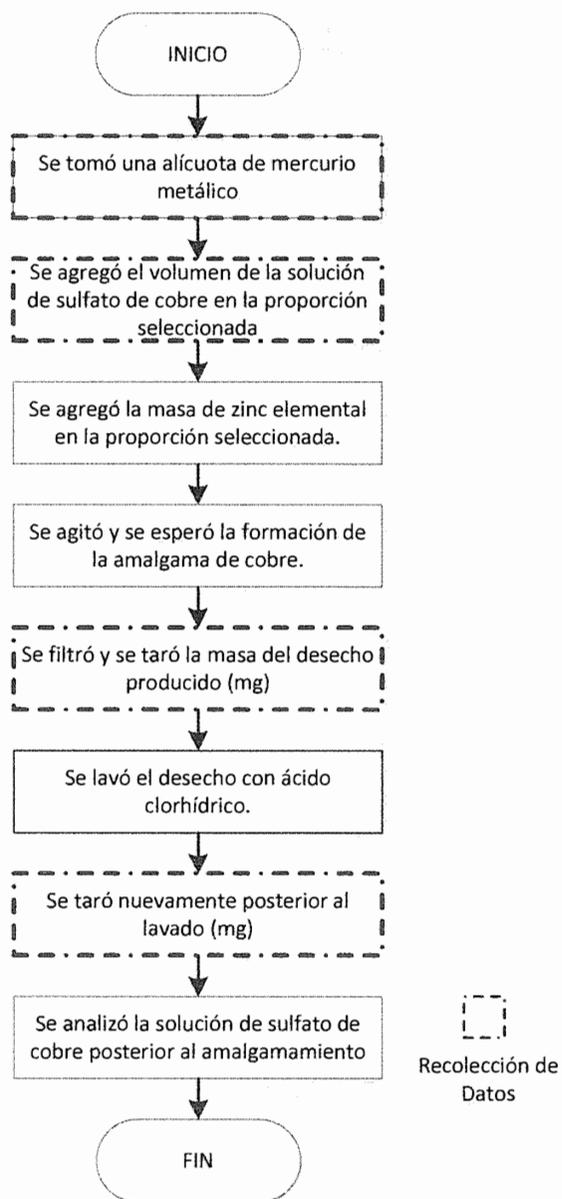
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Evaluación de la reacción redox entre el cobre y zinc en base a la proporción molar



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Proceso de inmovilización del mercurio mediante un procedimiento de amalgamamiento a partir de una solución de sulfato de cobre reducido con zinc metálico**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Tabulación y ordenamiento de datos

En este apartado se indica y muestra la forma en que se tabuló toda la información en la investigación, y como se ordenó de acuerdo a la elaboración de cada etapa. Se inició con el procedimiento de recuperación del mercurio metálico y luego se colocó el análisis del tratamiento.

- Evaluación de la recuperación de mercurio metálico ( $Hg^0$ ) procedente del tubo de descarga mediante tratamiento térmicos

Se inició la cuantificación de mercurio metálico en los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) con gota de mercurio formada; se sometieron a un tratamiento de 200 grados Celsius durante 15 minutos.

Tabla VII. **Evaluación del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) con gota de mercurio formada**

HgR: Recuperación de mercurio metálico por tratamiento térmico (mg)		Duración de tratamiento térmico (min)
		15
Temperatura de tratamiento térmico (°C)	200	HgR <sub>(200°C,15min)1</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)2</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)3</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)4</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)5</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)6</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)7</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)8</sub>
		HgR <sub>(200°C,15min)9</sub>

Fuente: elaboración propia.

Para la cuantificación del mercurio que se recuperó por el tratamiento térmico en los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) sin gota de mercurio formada, se realizaron las pruebas en triplicado y se tabularon como se indica a continuación.

Tabla VIII. **Evaluación del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) por tratamientos térmicos**

HgR: Recuperación Hg por tratamiento térmico (mg)		Duración de tratamiento térmico (min)		
		15	60	90
Temperatura tratamiento térmico (°C)	400	HgR <sub>(400°C,30min)1</sub>	HgR <sub>(400°C,60min)1</sub>	HgR <sub>(400°C,90min)1</sub>
		HgR <sub>(400°C,30min)2</sub>	HgR <sub>(400°C,60min)2</sub>	HgR <sub>(400°C,90min)2</sub>
		HgR <sub>(400°C,30min)3</sub>	HgR <sub>(400°C,60min)3</sub>	HgR <sub>(400°C,90min)3</sub>
	600	HgR <sub>(600°C,30min)1</sub>	HgR <sub>(600°C,60min)1</sub>	HgR <sub>(600°C,90min)1</sub>
		HgR <sub>(600°C,30min)2</sub>	HgR <sub>(600°C,60min)2</sub>	HgR <sub>(600°C,90min)2</sub>
		HgR <sub>(600°C,30min)3</sub>	HgR <sub>(600°C,60min)3</sub>	HgR <sub>(600°C,90min)3</sub>
	800	HgR <sub>(800°C,30min)1</sub>	HgR <sub>(800°C,60min)1</sub>	HgR <sub>(800°C,90min)1</sub>
		HgR <sub>(800°C,30min)2</sub>	HgR <sub>(800°C,60min)2</sub>	HgR <sub>(800°C,90min)2</sub>
		HgR <sub>(800°C,30min)3</sub>	HgR <sub>(800°C,60min)3</sub>	HgR <sub>(800°C,90min)3</sub>

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga posterior a los tratamientos térmicos

Para esta cuantificación, se lavaron las ampollas después de la recuperación del mercurio metálico con ácido nítrico. Se oxidaron los metales en las paredes de la ampolla y en los electrodos. Debido al precio de los

análisis por espectrometría de absorción atómica, se unieron los volúmenes de los lavados de las ampollas correspondientes al triplicado que se realizó en cada tratamiento térmico. Los resultados se tabularon de la siguiente forma.

Tabla IX. **Evaluación del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) con gota de mercurio integrada**

Hgr : Mercurio remanente en el tubo de descarga (mg/L)		Duración de tratamiento térmico (min)		
		15		
Temperatura de tratamiento térmico (°C)	200	Hgr <sub>(200°C, 15min)1</sub>		
		Hgr <sub>(200°C, 15min)2</sub>		
		Hgr <sub>(200°C, 15min)3</sub>		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Evaluación del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico**

Hgr : Mercurio remanente en el tubo de descarga (mg/L)		Duración de tratamiento térmico (min)		
		30	60	90
Temperatura de tratamiento térmico (°C)	400	Hgr <sub>(400°C, 30min)</sub>	Hgr <sub>(400°C, 60min)</sub>	Hgr <sub>(400°C, 90min)</sub>
	600	Hgr <sub>(600°C, 30min)</sub>	Hgr <sub>(600°C, 60min)</sub>	Hgr <sub>(600°C, 90min)</sub>
	800	Hgr <sub>(800°C, 30min)</sub>	Hgr <sub>(800°C, 60min)</sub>	Hgr <sub>(800°C, 90min)</sub>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga**

Pbr y Wr: Plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (mg/L)	Especie analizada	
	Plomo	Tungsteno
Resultado de la detección	(Detectado/No Detectado)	(Detectado/No Detectado)

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio mediante un procedimiento de amalgamamiento

Esta evaluación se dividió en tres etapas; la primera se basó en la evaluación de la reacción redox entre el cobre en su forma oxidada ( $\text{Cu}^{+2}$ ) y zinc metálico ( $\text{Zn}^0$ ), se varió la proporción molar entre estos para la selección de la proporción óptima. La segunda fue la evaluación de la proporción entre el cobre y el mercurio para la formación de la amalgama de cobre sólida. La tercera y última etapa consistió en la evaluación del proceso de inmovilización del mercurio mediante el procedimiento de amalgamamiento del mercurio con cobre.

Se utilizó la coloración de la solución de sulfato de cobre pentahidratado para evaluar la cantidad de cobre reducido durante los procedimientos, por lo que se elaboró una curva de calibración de concentración molar versus absorbancia. Se realizaron las diluciones partiendo de una solución saturada de sulfato de cobre pentahidratado. Para validar esta curva se trabajó con dos analistas para evaluar la reproducibilidad del método.

Tabla XII. Puntos curva de calibración de analista

Analista #				
No.	[Cu <sup>+2</sup> ]	Absorbancia		
		1	2	3
0	0,813	A <sub>1,1</sub>	A <sub>2,1</sub>	A <sub>3,1</sub>
1	0,407	A <sub>1,2</sub>	A <sub>2,2</sub>	A <sub>3,2</sub>
2	0,203	A <sub>1,3</sub>	A <sub>2,3</sub>	A <sub>3,3</sub>
3	0,102	A <sub>1,4</sub>	A <sub>2,4</sub>	A <sub>3,4</sub>
4	0,051	A <sub>1,5</sub>	A <sub>2,5</sub>	A <sub>3,5</sub>
5	0,025	A <sub>1,6</sub>	A <sub>2,6</sub>	A <sub>3,6</sub>
6	0,013	A <sub>1,7</sub>	A <sub>2,7</sub>	A <sub>3,7</sub>
7	0,006	A <sub>1,8</sub>	A <sub>2,8</sub>	A <sub>3,8</sub>

Fuente: elaboración propia.

Para la evaluación de la reacción redox se utilizó un volumen constante de la solución saturada de sulfato de cobre pentahidratado, siendo la cantidad de zinc la que se varió para obtener las proporciones molares que se evaluaron. Para determinar la cantidad de cobre oxidado (Cu<sup>+2</sup>) que persistió al finalizar la reacción, se utilizó el análisis por fotometría el cual se realizó en duplicado, y se tabuló de la manera siguiente.

Tabla XIII. Evaluación de la reacción redox en función de la proporción zinc – cobre para un tiempo de reacción de 5 minutos

A: Resultado fotometría		Cobre Final (Absorbancia)	
		1	2
Proporción molar zinc: cobre (Zn:Cu)	1:1	$A_{(1:1,1)}$	$A_{(1:1,2)}$
	2:1	$A_{(2:1,1)}$	$A_{(2:1,2)}$
	3:1	$A_{(3:1,1)}$	$A_{(3:1,2)}$
	4:1	$A_{(4:1,1)}$	$A_{(4:1,2)}$

Fuente: elaboración propia.

Para la evaluación del proceso de inmovilización del mercurio mediante el procedimiento de amalgamamiento a partir de la reacción redox se evaluaron diferentes proporciones de cobre: mercurio para observar la formación de la amalgama sólida y variando la concentración del cobre. En la tabla siguiente se registrarán los resultados.

Tabla XIV. Formación de amalgama de cobre

[Cu <sup>+2</sup> ]	Proporción molar cobre: mercurio (Cu:Hg)			
	1:1	2:1	3:1	4:1
0,25 M	(+/-)	(+/-)	(+/-)	(+/-)
0,5 M	(+/-)	(+/-)	(+/-)	(+/-)
0,75 M	(+/-)	(+/-)	(+/-)	(+/-)
1,0 M	(+/-)	(+/-)	(+/-)	(+/-)

Fuente: elaboración propia.

La evaluación del procedimiento de amalgamamiento con cobre consistió en el estudio de las especies presentes a lo largo de la inmovilización del mercurio. Se realizó en triplicado para determinar su repetitividad y para evaluar su reproducibilidad el procedimiento fue realizado por tres analistas. Los datos experimentales se registraron como se indica en la tabla siguiente.

Tabla XV. **Evaluación del procedimiento de amalgamamiento con cobre por analista**

Proceso de Inmovilización	Hg (mg)	v (mL)	F <sub>o</sub> (Absorbancia)	Zn <sub>o</sub> (mg)	F (Absorbancia)	DAC (mg)	ac (mg)	Hg <sup>+2</sup> (mg/L)
Tratamiento mercurio por amalgamamiento	Hg <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	F <sub>o1</sub>	Zn <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	DAC <sub>1</sub>	ac <sub>1</sub>	hg <sub>1</sub>
	Hg <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	F <sub>o2</sub>	Zn <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	DAC <sub>2</sub>	ac <sub>2</sub>	hg <sub>2</sub>
	Hg <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	F <sub>o3</sub>	Zn <sub>3</sub>	F <sub>3</sub>	DAC <sub>3</sub>	ac <sub>3</sub>	hg <sub>3</sub>

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Procesamiento de la información

El procesamiento de la información se realizó mediante las tablas de los resultados finales y siguiendo un tratamiento matemático que permitieron calcular los resultados de esta investigación.

- Evaluación de la recuperación de mercurio metálico ( $Hg^0$ ) procedente del tubo de descarga mediante tratamiento térmicos

Se determinó la masa de mercurio promedio recuperada a las variantes que se analizaron.

Tabla XVI. **Procesamiento de la información de la evaluación del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga con gota de mercurio**

PHgR: Promedio recuperación Hg por tratamiento térmico (mg)		Tiempo de Residencia en mufla (min)
		15
Temperatura de Tratamiento Térmico (°C)	200	HgR <sub>(200°C, 15min)1</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)2</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)3</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)4</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)5</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)6</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)7</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)8</sub>
		HgR <sub>(200°C, 15min)9</sub>
		<b>PROMEDIO</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Procesamiento de la información del mercurio metálico recuperado del tubo de descarga por tratamiento térmico**

PHgR: Promedio Hg recuperado por tratamiento térmico		Tiempo de Residencia en mufla (min)		
		30	60	90
Temperatura Tratamiento Térmico (°C)	400	HgR <sub>(400°C,30min)1</sub>	HgR <sub>(400°C,60min)1</sub>	HgR <sub>(400°C,90min)1</sub>
		HgR <sub>(400°C,30min)2</sub>	HgR <sub>(400°C,60min)2</sub>	HgR <sub>(400°C,90min)2</sub>
		HgR <sub>(400°C,30min)3</sub>	HgR <sub>(400°C,60min)3</sub>	HgR <sub>(400°C,90min)3</sub>
	PROMEDIO	PHgR <sub>(400°C,30min)</sub>	PHgR <sub>(400°C,60min)</sub>	PHgR <sub>(400°C,90min)</sub>
	600	HgR <sub>(600°C,30min)1</sub>	HgR <sub>(600°C,60min)1</sub>	HgR <sub>(600°C,90min)1</sub>
		HgR <sub>(600°C,30min)2</sub>	HgR <sub>(600°C,60min)2</sub>	HgR <sub>(600°C,90min)2</sub>
		HgR <sub>(600°C,30min)3</sub>	HgR <sub>(600°C,60min)3</sub>	HgR <sub>(600°C,90min)3</sub>
	PROMEDIO	PHgR <sub>(600°C,30min)</sub>	PHgR <sub>(600°C,60min)</sub>	PHgR <sub>(600°C,90min)</sub>
	800	HgR <sub>(800°C,30min)1</sub>	HgR <sub>(800°C,60min)1</sub>	HgR <sub>(800°C,90min)1</sub>
		HgR <sub>(800°C,30min)2</sub>	HgR <sub>(800°C,60min)2</sub>	HgR <sub>(800°C,90min)2</sub>
		HgR <sub>(800°C,30min)3</sub>	HgR <sub>(800°C,60min)3</sub>	HgR <sub>(800°C,90min)3</sub>
	PROMEDIO	PHgR <sub>(800°C,30min)</sub>	PHgR <sub>(800°C,30min)</sub>	PHgR <sub>(800°C,30min)</sub>

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga posterior a los tratamientos térmicos.

Los resultados de las técnicas instrumentales se obtuvieron en las unidades de concentración partes por millón, por lo que se utilizó la ecuación siguiente para determinar la masa en miligramos de los metales en los tubos de descarga (ampolla de cuarzo).

Ecuación 1. **Masa**

$$m_s = (V * R_f)$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- m<sub>s</sub>: Masa del componente analizado (mg)
- V: Volumen inicial de muestra (L)
- R<sub>f</sub>: Resultado en unidades de partes por millón (mg/L)

Tabla XVIII. **Procesamiento de la información del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) con gota de mercurio formada**

PHgr: Promedio mercurio remanente en el tubo de descarga (mg)		Tiempo de Residencia en mufla (min)
		15
Temperatura de Tratamiento Térmico (°C)	200	Hgr <sub>(200°C, 15min)1</sub>
		Hgr <sub>(200°C, 15min)2</sub>
		Hgr <sub>(200°C, 15min)3</sub>
	PROMEDIO	PHgr

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Procesamiento de la información del mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) sin gota de mercurio formada**

Hgr: Mercurio remanente (mg)		Tiempo de Residencia en mufla (min)		
		30	60	90
Temperatura de Tratamiento Térmico (°C)	400	Hgr <sub>(400°C,30min)</sub>	Hgr <sub>(400°C,60min)</sub>	Hgr <sub>(400°C,90min)</sub>
	600	Hgr <sub>(600°C,30min)</sub>	Hgr <sub>(600°C,60min)</sub>	Hgr <sub>(600°C,90min)</sub>
	800	Hgr <sub>(800°C,30min)</sub>	Hgr <sub>(800°C,60min)</sub>	Hgr <sub>(800°C,90min)</sub>

Fuente: elaboración propia.

- Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio mediante un procedimiento de amalgamamiento.

Para la primera parte, en la evaluación de la reacción redox, se determinó los moles iniciales de cobre y los finales, de manera que de acuerdo al porcentaje de moles reducidos se eligió la proporción de moles zinc: cobre óptima.

La coloración azul del sulfato de cobre pentahidratado, permitió la elaboración de la curva de calibración. Se prepararon soluciones a concentraciones conocidas y se midieron sus absorbancias, el modelo esperado es lineal y se representó con la ecuación descrita a continuación.

**Ecuación 2. Masa componente por curva de calibración**

$$A = mM + b$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

A: Absorbancia

M: Molaridad de la especie analizada (M)

m,b: Constantes del modelo lineal

Los resultados de los análisis fotométricos que se obtuvieron del modelo matemático era en unidades de molaridad, por lo que se trató con el siguiente modelo matemático para la determinación de los moles en cada etapa de la reacción.

**Ecuación 3. Estequiometria moles de cobre**

$$n = m * (1\text{molX}/M_m\text{X})$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

n: Moles del componente analizado (mol)

m: Masa del componente analizado (g)

M<sub>m</sub>: Masa molecular del componente analizado (g/mol)

Tabla XX. **Procesamiento de la información moles reducidos de cobre**

A: Análisis fotométrico	Cobre Final (Absorbancia)		Moles cobre final (mol)	
	1	2	1	2
(1:1)	$A_{(1:1,1)}$	$A_{(1:1,2)}$	$n_{f(1:1,1)}$	$n_{f(1:1,2)}$
(2:1)	$A_{(2:1,1)}$	$A_{(2:1,2)}$	$n_{f(2:1,1)}$	$n_{f(2:1,2)}$
(3:1)	$A_{(3:1,1)}$	$A_{(3:1,2)}$	$n_{f(3:1,1)}$	$n_{f(3:1,2)}$
(4:1)	$A_{(4:1,1)}$	$A_{(4:1,2)}$	$n_{f(4:1,1)}$	$n_{f(4:1,2)}$

Fuente: elaboración propia.

La determinación del porcentaje de moles reducidos de cobre se obtuvo utilizando la ecuación siguiente:

Ecuación 4. **Porcentaje de rendimiento reducción de cobre**

$$\%Cu = (n_{red}/n_o) * 100$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

%R: Porcentaje de cobre reducido

$n_{red}$ : Moles de cobre reducidos

$n_o$ : Moles iniciales de cobre en solución de sulfato de cobre

Los resultados se tabularon en la tabla siguiente:

Tabla XXI. **Porcentaje de reducción de cobre por fotometría**

%Cu: Porcentaje de reducción		$n_o$ : Moles cobre inicial (mol)	$n_{red}$ : Moles reducidos (mol)	% Cobre reducido
<b>Proporción molar zinc: cobre (Zn:Cu)</b>	<b>1:1</b>	$n_{o(1:1)}$	$n_{red (1:1)}$	%Cu <sub>1,1</sub>
	<b>2:1</b>	$n_{o(2:1)}$	$n_{red (2:1)}$	%Cu <sub>2,1</sub>
	<b>3:1</b>	$n_{o(3:1)}$	$n_{red (3:1)}$	%Cu <sub>3,1</sub>
	<b>4:1</b>	$n_{o(4:1)}$	$n_{red (4:1)}$	%Cu <sub>4,1</sub>

Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el proceso de inmovilización del mercurio por amalgamamiento con cobre, se utilizaron las proporciones zinc: cobre y mercurio: cobre seleccionadas anteriormente.

Tabla XXII. **Determinación de moles de cobre amalgamados en el proceso de inmovilización del mercurio**

Analista	Hg <sub>0</sub> (mg)	V (mL)	F <sub>0</sub> (Abs)	C <sub>0</sub> (M)	$n_{Cu^{+2}_o}$ (mol)	Zn <sub>0</sub> (mg)	F <sub>f</sub> (Abs)	C <sub>f</sub> (M)	$n_{Cu^{+2}_f}$ (mol)	$n_{red}$ (mol)	
#	1	Hg <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	F <sub>01</sub>	C <sub>01</sub>	$n_{Cu^{+2}_{o1}}$	Zn <sub>01</sub>	F <sub>f1</sub>	C <sub>f1</sub>	$n_{Cu^{+2}_{f1}}$	$n_{red 1}$
	2	Hg <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	F <sub>02</sub>	C <sub>02</sub>	$n_{Cu^{+2}_{o2}}$	Zn <sub>02</sub>	F <sub>f2</sub>	C <sub>f2</sub>	$n_{Cu^{+2}_{f2}}$	$n_{red 2}$
	3	Hg <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	F <sub>03</sub>	C <sub>03</sub>	$n_{Cu^{+2}_{o3}}$	Zn <sub>03</sub>	F <sub>f3</sub>	C <sub>f3</sub>	$n_{Cu^{+2}_{f3}}$	$n_{red 3}$
<b>Promedio</b>	PHg	PV	PF <sub>0</sub>	PC <sub>0</sub>	$Pn_{Cu^{+2}_o}$	PZn <sub>0</sub>	PF <sub>f</sub>	PC <sub>f</sub>	$Pn_{Cu^{+2}_f}$	$Pn_{red}$	
<b>Desviación</b>	DH	DV	DF <sub>0</sub>	DC <sub>0</sub>	$Dn_{Cu^{+2}_o}$	DZn <sub>0</sub>	DF <sub>f</sub>	DC <sub>f</sub>	$Dn_{Cu^{+2}_f}$	$Dn_{red}$	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento**

Analista		DAC: Masa Amalgama+Zn <sup>0</sup> (mg)	ac: Masa amalgama de cobre (mg)	Zn <sub>ex</sub> : Zinc en exceso (mg)	Hg <sup>+2</sup> : Mercurio oxidado (mg)	Zn <sup>+2</sup> : Zinc oxidado en la redox (mg/L)
#	1	DAC <sub>1</sub>	ac <sub>1</sub>	Zn <sub>ex1</sub>	Hg <sup>+2</sup> <sub>1</sub>	Zn <sup>+2</sup> <sub>1</sub>
	2	DAC <sub>2</sub>	ac <sub>2</sub>	Zn <sub>ex2</sub>	Hg <sup>+2</sup> <sub>2</sub>	Zn <sup>+2</sup> <sub>2</sub>
	3	DAC <sub>3</sub>	ac <sub>3</sub>	Zn <sub>ex3</sub>	Hg <sup>+2</sup> <sub>3</sub>	Zn <sup>+2</sup> <sub>3</sub>
<b>Promedio</b>		<b>PAC</b>	<b>Pac</b>	<b>PZn</b>	<b>Phg</b>	<b>PZn<sup>+2</sup></b>
<b>Desviación</b>		<b>DDAC</b>	<b>Dac</b>	<b>DZn</b>	<b>Dhg</b>	<b>DZn<sup>+2</sup></b>

Fuente: elaboración propia.

Con la masa de ambos componentes de la amalgama de cobre se determinó la cantidad de moles que representan y su proporción molar.

Ecuación 5. **Proporción molar amalgama de cobre**

$$\text{Cu:Hg} = n_{\text{Cu}}/n_{\text{Hg}}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

Cu: Hg: Proporción molar cobre- mercurio

n<sub>Cu</sub>: Moles de cobre en la amalgama de cobre

n<sub>Hg</sub>: Moles de mercurio en la amalgama de cobre

Tabla XXIV. **Procesamiento de la información proporción molar amalgama de cobre**

Analista	$n_{Cu}$ : Cobre amalgamado (mol)	$n_{Hg}$ : Mercurio inicial (mol)	$n_{Hg}$ : Mercurio oxidado (mol)	$n_{Hga}$ : Mercurio amalgamado (mol)	Cu:Hg	
#	1	$n_{Cu1}$	$n_{Hg1o}$	$n_{Hg1}$	$n_{Hg1}$	Cu:Hg <sub>1</sub>
	2	$n_{Cu2}$	$n_{Hg2o}$	$n_{Hg2}$	$n_{Hg2}$	Cu:Hg <sub>2</sub>
	3	$n_{Cu3}$	$n_{Hg3o}$	$n_{Hg3}$	$n_{Hg3}$	Cu:Hg <sub>3</sub>
<b>Promedio</b>	<b><math>Pn_{Cu}</math></b>	<b><math>Pn_{Hgo}</math></b>	<b><math>Pn_{Hg}</math></b>	<b><math>Pn_{Hga}</math></b>	<b><math>PCu:Hg</math></b>	
<b>Desviación</b>	<b><math>Dn_{Cu}</math></b>	<b><math>Dn_{Hgo}</math></b>	<b><math>Dn_{Hg}</math></b>	<b><math>Dn_{Hga}</math></b>	<b><math>DCu:Hg</math></b>	

Fuente: elaboración propia.

- Determinar porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento

El porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento se obtuvo con la siguiente ecuación:

**Ecuación 7. Porcentaje mercurio tratado**

$$\%Hg_{\text{inmovilizado}} = \{(Hg_{\text{inicial}} - Hg_{\text{oxidado}}) / Hg_{\text{inicial}}\} * 100$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

$\%Hg_{\text{inmovilizado}}$ : Porcentaje mercurio tratado por amalgamamiento

Tabla XXV. **Procesamiento de información porcentaje de mercurio tratado por amalgamamiento**

Analista		Hg <sub>o</sub> : Mercurio inicial (mg)	Hg <sup>+2</sup> : Mercurio oxidado (mg)	%Hg <sub>i</sub> : Mercurio inmovilizado
#	1	Hg <sub>o1</sub>	hg <sub>1</sub>	%Hg <sub>i1</sub>
	2	Hg <sub>o2</sub>	hg <sub>2</sub>	%Hg <sub>i2</sub>
	3	Hg <sub>o3</sub>	hg <sub>3</sub>	%Hg <sub>i3</sub>
Promedio		<b>PHg<sub>o</sub></b>	<b>Phg</b>	<b>P%Hg<sub>i</sub></b>
Desviación		<b>DHg<sub>o</sub></b>	<b>Dhg</b>	<b>D%Hg<sub>i</sub></b>

Fuente: elaboración propia.

- Evaluar mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento

Para la determinación del zinc, se obtuvo la diferencia entre las taras al lavar el precipitado de amalgama de cobre y zinc con ácido clorhídrico. Se utilizó la ecuación de porcentaje másico.

Ecuación 8. **Porcentaje en masa**

$$\%m_i = [m_i / m_{total}] * 100$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

m<sub>i</sub>: Masa componente i en muestra (g)

m<sub>total</sub>: Masa total de la muestra (g)

Se expresó la composición del desecho en porcentaje másico y se registró en la tabla siguiente.

**Tabla XXVI. Procesamiento de información de la evaluación mediante balance de masa de la proporción experimental del desecho generado**

Analista		DAC: Desecho (mg)	%ac: amalgama	%Zn: zinc
#	1	AC <sub>1</sub>	%ac <sub>1</sub>	%Zn <sub>1</sub>
	2	AC <sub>2</sub>	%ac <sub>2</sub>	%Zn <sub>2</sub>
	3	AC <sub>3</sub>	%ac <sub>3</sub>	%Zn <sub>3</sub>
Promedio		PAC	P%ac	P%Zn
Desviación		DAC	D%ac	D%Zn

Fuente: elaboración propia.

### 3.9. Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados estadísticamente se utilizarán las siguientes ecuaciones y técnicas, de manera que se pueda evaluar la validez de los resultados y comparar los métodos utilizados en la experimentación de esta investigación.

- Promedio

Este parámetro estadístico es muy importante ya que en la experimentación es muy poco probable que una única medición sea suficiente

para definir el valor de alguna propiedad o característica, es por ello que se necesita el valor medio de las repeticiones realizadas.

**Ecuación 11. Promedio**

$$x = \sum x_i / n$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- x: Promedio
- $x_i$ : Resultado i
- n: Cantidad de resultados

- **Desviación estándar**

Esta es una medida de la dispersión de los resultados obtenidos de las repeticiones de un procedimiento experimental con respecto del valor promedio, representa el error aleatorio.

**Ecuación 10. Desviación estándar**

$$S = \sqrt{\frac{\sum_0^i (x_i - x_{promedio})^2}{n - 1}}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- S: Desviación estándar
- $x_i$ : Resultado  $i$
- $x_{prom}$ : Resultado promedio
- n: Número de repeticiones

- **Análisis de Varianza**

Este parámetro establece si los valores de una variable dependiente dependen de los niveles de variación de dos factores o de la interacción entre ambos.

En esta investigación se analizará si la recuperación del mercurio metálico por tratamiento térmico tiene influencia en la temperatura y el tiempo de duración del tratamiento.

También se evaluará si el procedimiento de amalgamamiento se ve afectado por la variación del analista que lo ejecuta, de manera que se establezca que existen diferencias significativas en los productos obtenidos de este.

### **3.10. Plan de análisis de los resultados**

Con respecto de la recolección, tabulación, análisis y procesamiento de la información se prepararon los resultados y se decidió que para efectos de esta investigación los datos numéricos son valiosos. Por lo que la presentación de resultados se realizó con las metodologías indicadas a continuación.

### **3.10.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables**

En la evaluación, análisis y comparación de los resultados de los distintos procedimientos experimentales se utilizaron tablas y gráficas, así como modelos y métodos matemáticos.

### **3.10.2. Programas a utilizar para análisis de datos**

Los distintos softwares de uso común para el procesamiento de datos Los programas que se utilizaron fueron:

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- InfoStat
- Microsoft Visio

1. The first step in the process of identifying a problem is to define the problem clearly and concisely. This involves identifying the symptoms and the underlying causes of the problem.

2. The second step is to gather information about the problem. This involves researching the problem and identifying the resources available to solve it.

3. The third step is to generate possible solutions. This involves brainstorming and identifying potential solutions to the problem.

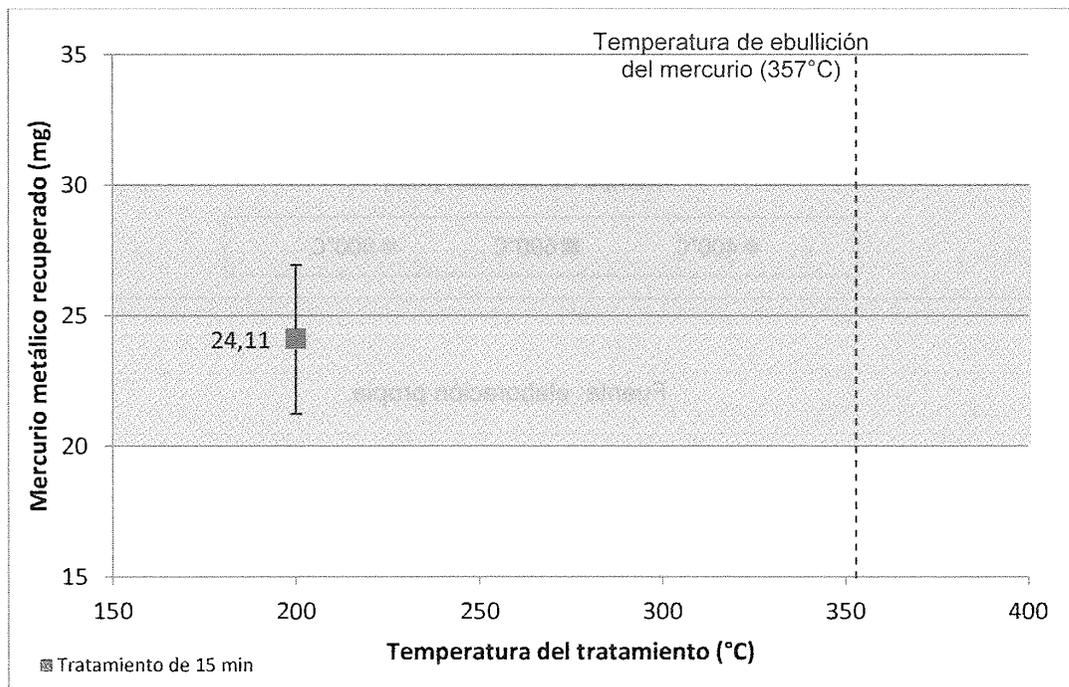
4. The fourth step is to evaluate the solutions. This involves comparing the solutions and identifying the most effective one.

5. The fifth step is to implement the solution. This involves putting the solution into action and monitoring its progress.

## 4. RESULTADOS

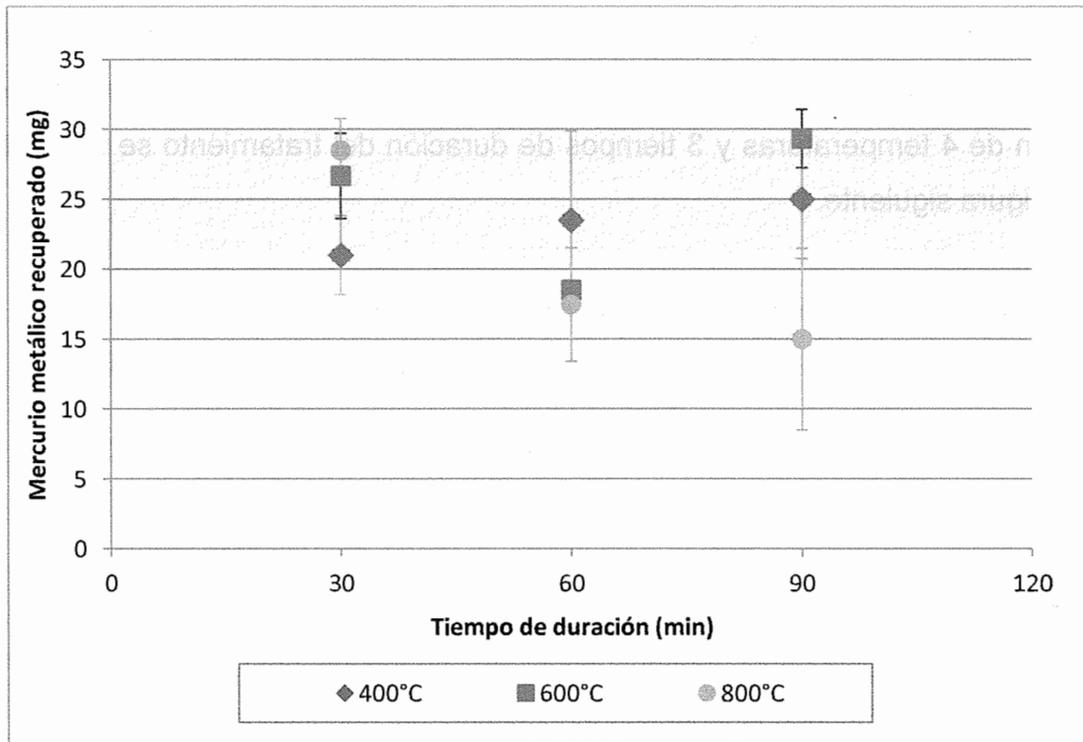
La evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamientos térmicos, en función de 4 temperaturas y 3 tiempos de duración del tratamiento se presenta en la figura siguiente.

Figura 34. **Recuperación de mercurio metálico de los tubos de descarga con gota de mercurio metálico formada**



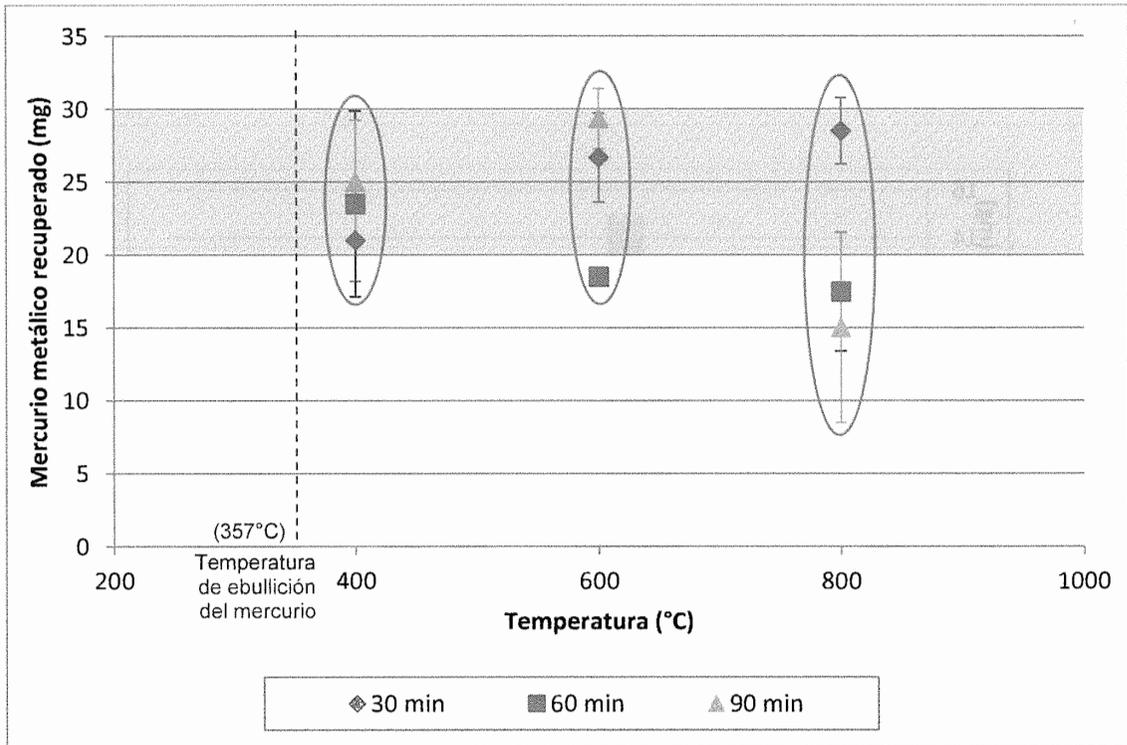
Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Recuperación de mercurio metálico de los tubos de descarga sin gota de mercurio formada en función del tiempo de duración del tratamiento



Fuente: elaboración propia.

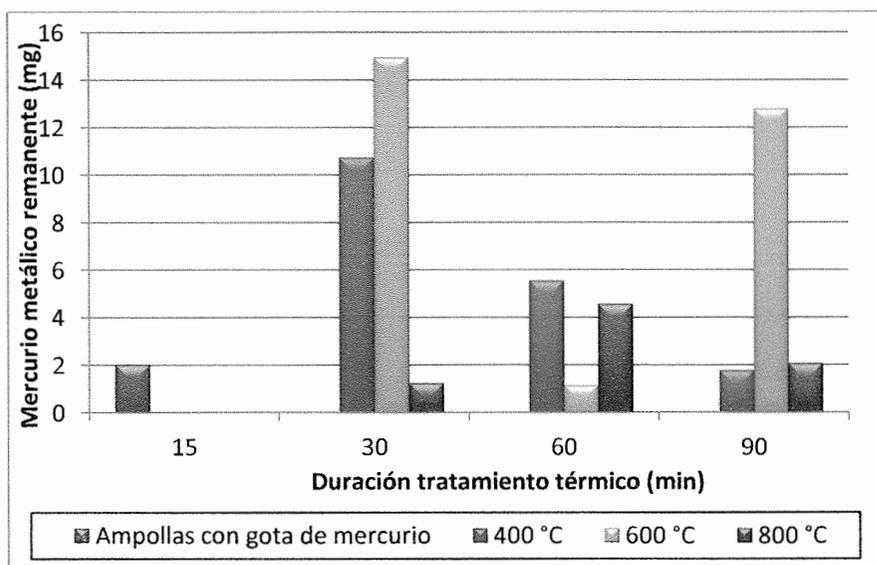
Figura 36. **Recuperación de mercurio metálico de los tubos de descarga sin gota de mercurio formada mediante tratamiento térmico en función de la temperatura**



Fuente: elaboración propia.

Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos.

Figura 37. **Mercurio metálico remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Detección de plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos**

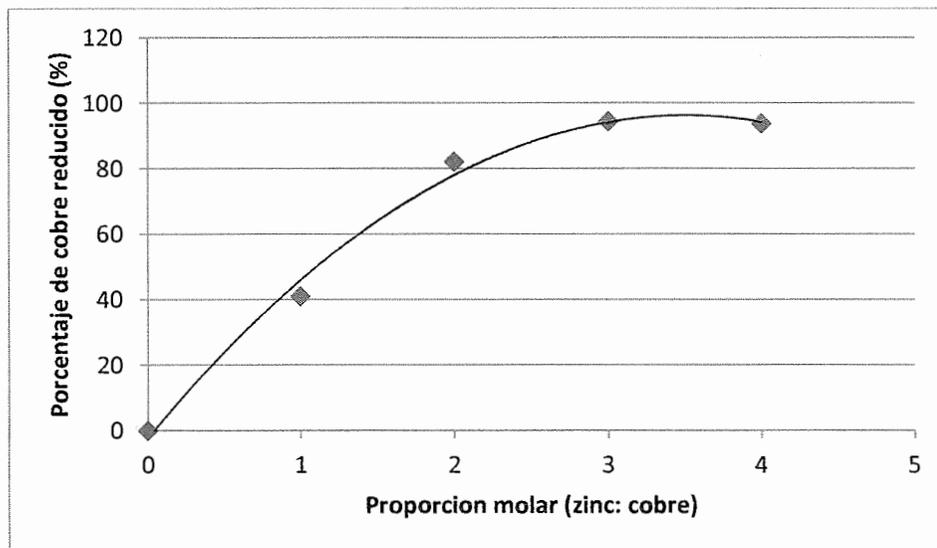
Detección de metales en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo)	Especie analizada	
	Plomo	Tungsteno
	No detectado	No detectado

Fuente: elaboración propia.

Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento.

- Evaluación de la reacción redox a dos fases entre el cobre  $[Cu^{+2}] = 0,814$  M y zinc elemental ( $Zn^0$ ) para un tiempo de reacción de 5 minutos

Figura 38. **Porcentaje de cobre reducido en la reacción redox a dos fases entre el cobre  $[Cu^{+2}] = 0,814$  M y zinc elemental ( $Zn^0$ ) para un tiempo de reacción de 5 minutos**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Modelo matemático**

Modelo matemático	$R^2$
$\%Cu_{red} = - 8,01 (Zn:Cu)^2 + 56,12 (Zn:Cu) - 1,95$	0,9933

Fuente: elaboración propia.

Evaluación de la proporción cobre - mercurio para la formación de amalgama en el procedimiento con la reacción redox con una proporción zinc: cobre (1:1) y para un tiempo de reacción de 5 minutos.

Tabla XXIX. **Formación de amalgama de cobre sólida**

[Cu <sup>+2</sup> ]	Proporción molar cobre – mercurio (Cu:Hg)			
	1:1	2:1	3:1	4:1
0,25 M	-	-	-	-
0,5 M	-	-	-	-
0,75 M	+	+	+	+
1,0 M	+	+	+	+

Fuente: elaboración propia.

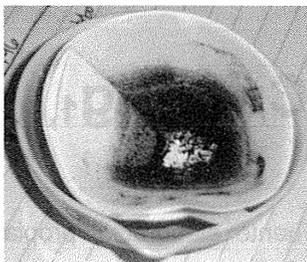
Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento.

Tabla XXX. **Balance de masa del proceso de inmovilización del mercurio metálico**

Analista	Mercurio inicial (mg)	Zinc inicial (mg)	Desecho Cu <sub>x</sub> Hg <sub>y</sub> + Zn <sup>0</sup> (mg)	Zinc en exceso (mg)	Amalgama de cobre (mg)
1	290,00	568,40	917,00	399,70	517,30
2	242,70	513,80	835,70	408,00	427,70
3	236,30	462,17	792,00	356,30	435,70
<b>Promedio</b>	<b>256,33</b>	<b>512,79</b>	<b>848,23</b>	<b>388,00</b>	<b>460,23</b>
<b>Desviación</b>	<b>29,33</b>	<b>65,32</b>	<b>63,44</b>	<b>27,76</b>	<b>49,58</b>

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Amalgama de cobre sólida formada**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

Tabla XXXI. **Evaluación de la solución de sulfato de cobre posterior al procedimiento de amalgamamiento**

Especie analizada	Zinc oxidado (mg/L)	Cobre oxidado (mg/L)	Mercurio oxidado (µg)
<b>Promedio</b>	<b>12,26</b>	<b>0,1</b>	<b>0,64</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Proporción molar de cobre: mercurio experimental en el procedimiento de amalgamamiento**

Analista	Moles de cobre amalgamados	Moles de mercurio amalgamado (mol Hg <sup>0</sup> )	Proporción Experimental Cu <sub>x</sub> Hg <sub>y</sub>
<b>1</b>	0,004	0,001	2,93
<b>2</b>	0,003	0,001	2,83
<b>3</b>	0,003	0,001	2,90
<b>Promedio</b>	<b>0,004</b>	<b>0,001</b>	<b>2,89</b>
<b>Desviación</b>	<b>0,001</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,09</b>

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Representación química de la proporción cobre: mercurio en la amalgama de cobre experimental**



Fuente: elaboración propia.

Determinación del porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento.

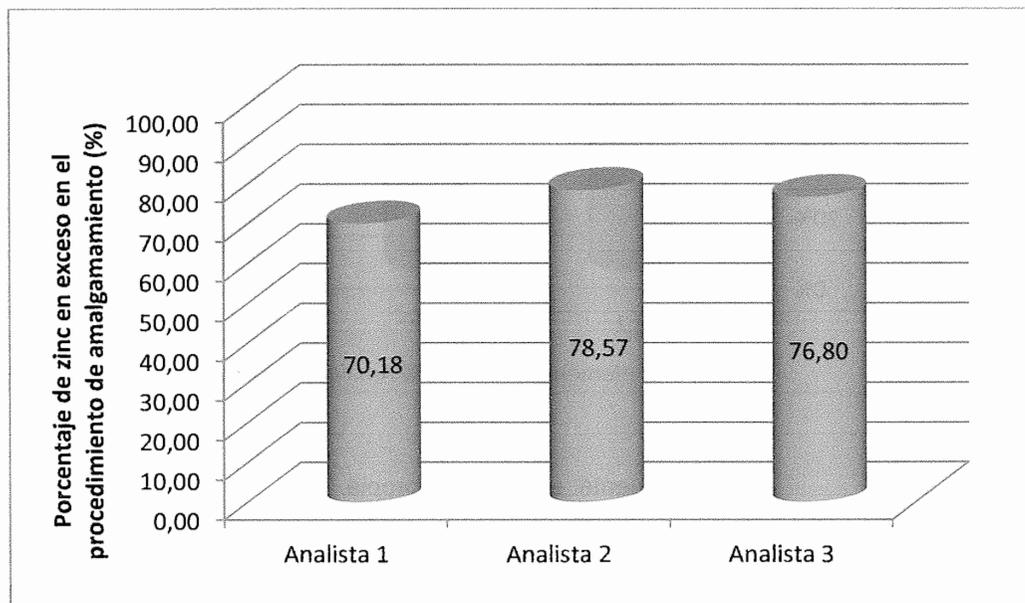
Tabla XXXIII. **Porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento**

Analista	Masa mercurio inicial (mg)	Mercurio oxidado no amalgamado ( $\mu\text{g}$ )	Mercurio amalgamado (mg)	% Mercurio inmovilizado
1	290,00	0,64	290,00	99,99
2	242,67	0,64	242,67	99,99
3	236,33	0,64	236,33	99,99
<b>Promedio</b>	<b>256,33</b>	<b>0,64</b>	<b>256,33</b>	<b>99,99</b>
<b>Desviación</b>	<b>32,37</b>	<b>0,01</b>	<b>32,37</b>	<b>0,00</b>

Fuente: elaboración propia.

Determinación mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento.

Figura 41. **Porcentaje de zinc en exceso en el procedimiento de amalgamamiento**



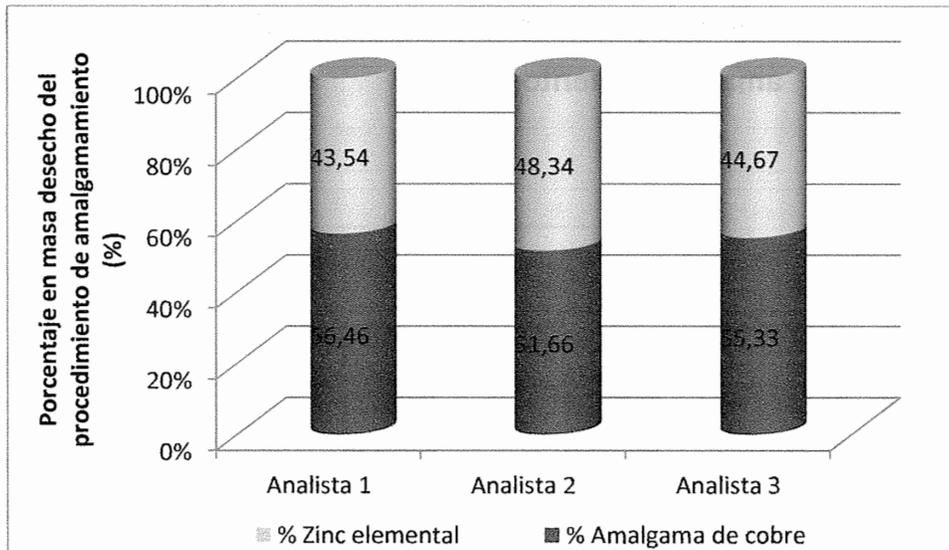
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Porcentaje de zinc en exceso promedio en el procedimiento de amalgamamiento**

Porcentaje de zinc en exceso	
Promedio	75,19
Desviación	4,42

Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Proporción másica experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Proporción experimental promedio del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento**

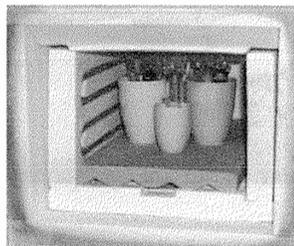
Desecho del procedimiento de amalgamamiento	% Masa amalgama de cobre (Cu <sub>2.89</sub> Hg <sub>1.00</sub> )	% Masa de zinc elemental
<b>Promedio</b>	<b>54,48</b>	<b>45,52</b>
<b>Desviación</b>	<b>4,34</b>	<b>4,34</b>

Fuente: elaboración propia.

Procedimiento técnico de recuperación y tratamiento del mercurio metálico proveniente de los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) de las lámparas de alta presión.

- Tomar 10 tubos de descarga (ampollas de cuarzo).
- Verificar el estado físico del tubo de descarga y separar los que presenten:
  - Rajaduras
  - Aberturas o agujeros
  - Fracturas
- Colocarse el equipo de protección personal para el manejo de objetos a altas temperaturas (guantes térmicos y careta).
- Introducir los tubos de descarga en crisoles de porcelana y colocarlos en la mufla para el tratamiento térmico a 400 grados Celsius durante 30 minutos

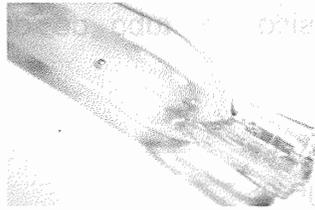
Figura 43. **Tratamiento térmico tubos de descarga**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Retirar los tubos de descarga de la mufla, colocarlos en posición horizontal sobre una superficie de aluminio y enfriar hasta observar la formación de la gota de mercurio.

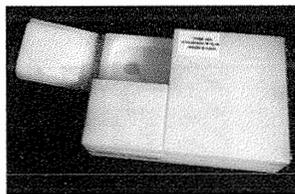
Figura 44. **Formación gota de mercurio**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Colocarse el equipo de protección personal para tratamiento de desechos tóxicos. Utilizar el equipo de apertura de tubos de descarga para la recuperación de las gotas de mercurio metálico formadas y colocarlas en un tubo de ensayo con capacidad de 10 mililitros previamente tarado.

Figura 45. **Equipo de apertura de tubos de descarga**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Tarar el tubo de ensayo con la gota de mercurio y determinar la masa de mercurio recuperada.
- Agregar el volumen de solución de sulfato de cobre pentahidratado y la masa de zinc metálico en base a los siguientes factores dependientes de la masa de mercurio metálico a tratar.

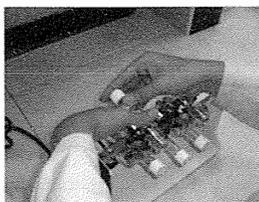
Tabla XXXVI. **Factores de reactivos para el procedimiento de inmovilización**

REACTIVO	FACTOR
Volumen de solución saturada de sulfato de cobre pentahidratado 0,81 M (mL)	$V = 18,46 \times [\text{Masa de mercurio (g)}]$
Zinc metálico (g)	$Zn = 1,96 \times [\text{Masa de mercurio (g)}]$

Fuente: elaboración propia.

- Colocar el tubo de ensayo en el equipo de agitación e iniciar operación por 10 minutos para completar la formación de la amalgama de cobre.

Figura 46. **Agitación tubos de ensayo**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Filtrar el desecho obtenido del procedimiento de amalgamamiento y colocar en desecador para eliminar humedad, pesar el contenido total del desecho.

**Figura 47. Filtración desecho**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Disponer en un contenedor plástico del desecho obtenido y el resto de materiales utilizados, el cuarzo de la ampolla y los electrodos de tungsteno, para encapsular los desechos sólidos del procedimiento.

**Figura 48. Encapsulado de los desechos tóxicos**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Encriptar el contenedor plástico en cilindros de concreto.

Figura 49. **Cilindros de concreto con desechos sólidos tóxicos**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

- Preparar para confinamiento y entregar a la empresa autorizada por el MARN para su disposición final.

Figura 50. **Entrega cilindros con desechos tóxicos a empresa autorizada para su disposición final**



Fuente: CII, FIUSAC.

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general de esta investigación fue la evaluación de la recuperación y el tratamiento del mercurio contenido en los tubos de descarga de las lámparas de mercurio de alta presión utilizadas en la iluminación pública. El tema se derivó de la falta de un protocolo municipal para el tratamiento y disposición de los desechos tóxicos, generados en la sustitución de las lámparas y que generalmente terminan en los vertederos municipales.

El mercurio elemental y sus especies orgánicas representan un alto riesgo para la salud humana, son tóxicas, corrosivas e irritantes, pero su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica es lo que genera un mayor impacto ambiental. Por ello, se buscó la recuperación del mercurio y su tratamiento como una amalgama de cobre, de manera que su movilidad y fluidez natural, característica de su estado físico, se modificase a un estado inmóvil, lo que permite retenerlo en un espacio confinado y así reducir su capacidad de acumularse y trasladarse por los ciclos naturales de los ecosistemas.

Las lámparas de alta presión del alumbrado público que se utilizaron para la experimentación provenían del municipio de Mixco, Guatemala; siendo esta municipalidad la única que recolectó y almacenó estos desechos, sin embargo, no tienen un procedimiento de tratamiento para su disposición final.

Entre los tubos de descarga recolectados se distinguieron diferentes características que permitía su clasificación, sin embargo, la de mayor relevancia, fue la presencia o ausencia de mercurio metálico en forma de gota.

Debido a que todos los desechos del municipio eran almacenados en una misma bodega, no se pudo identificar si los tubos de descarga con características similares provenían de una misma zona, pero se consideró que estos estaban expuestos a características ambientales similares, así como a las mismas variaciones en el flujo eléctrico, que pudieron afectar su rendimiento y proveerles de las características finales observadas.

Durante el funcionamiento de la lámpara, el mercurio está presente como vapor, pero cuando se apaga y conforme se enfría este se condensa. Al cambiar de estado ocurre la formación de la gota de mercurio metálico, la cual adquiere forma esférica debido a la intensidad de sus fuerzas intermoleculares.

Figura 51. **Tubos de descarga con gota de mercurio metálico formada**

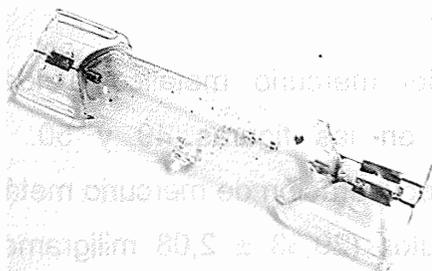


Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

Debido a los repetidos ciclos de enfriamiento, el mercurio puede mezclarse con otros metales o compuestos en el interior del tubo de descarga y esto provoca que la intensidad de las fuerzas intermoleculares, y por consiguiente la tensión superficial del metal disminuyan. Esto se manifiesta en la adherencia del mercurio a las paredes, donde pierde su forma esférica. Además, la deposición del mercurio también se realiza sobre los electrodos de tungsteno, lo que provoca un tipo de interacción con mayor intensidad.

Otra característica común que se observó fue el oscurecimiento de la ampolla. El color negro que adquiere la ampolla de cuarzo se debe a la deposición del tungsteno, componente del electrodo, sobre las paredes de cuarzo, esto reduce la emisión de la luz producida por la lámpara. Esto y el consumo energético requerido hacen que la lámpara pierda su eficiencia ya que se disminuye la transmisión de luz y se mantiene el consumo energético.

Figura 52. **Tubos de descarga sin gota de mercurio metálico formada**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

Se eligieron tubos de descarga con y sin gota de mercurio, así como aquellos con paredes oscuras, para la evaluación de la recuperación del mercurio metálico por tratamiento térmico.

En la evaluación del mercurio metálico que se recuperó proveniente de los tubos de descarga con gota de mercurio metálico formada se obtuvo un valor promedio de  $24,11 \pm 2,85$  miligramos según figura 48, valor acorde al rango de masa proveído por los fabricantes. Estos tubos de descarga se sometieron a un tratamiento térmico leve para separar el mercurio que pudiera estar adherido en las paredes de cuarzo.

Para la evaluación de la recuperación de mercurio metálico en los tubos de descarga sin gota formada, se eligieron tres temperaturas superiores a 357 grados Celsius, punto de ebullición del mercurio, estas fueron 400, 600 y 800 grados Celsius. Se eligieron diferencias de temperaturas altas para garantizar la separación y evaporación del mercurio adherido en el cuarzo o amalgamado en el electrodo de tungsteno. La temperatura se combinó con el tiempo de duración del tratamiento térmico y se evaluó cada temperatura a 30, 60 y 90 minutos, con el fin de tener períodos extensos que promovieran la evaporación del mercurio en su totalidad.

La recuperación del mercurio metálico a los tratamientos térmicos evaluados se presenta en las figuras 49 y 50. Se estableció que los tratamientos con mayor recuperación de mercurio metálico fueron a 600 grados Celsius durante 90 minutos ( $29,33 \pm 2,08$  miligramos), 800 grados Celsius durante 30 minutos ( $28,50 \pm 2,26$  miligramos) y 600 grados Celsius durante 30 minutos ( $26,67 \pm 3,06$  miligramos). Con ello se podría atribuir que a mayor temperatura mayor masa recuperada, sin embargo, mediante el análisis de la varianza y sus efectos se determinó que no es así.

En la figura 49 se analiza el efecto del tiempo de duración del tratamiento térmico en la recuperación del mercurio metálico. Conforme el tiempo de duración es mayor, a 400 grados Celsius se observó que la masa de mercurio metálico recuperado aumentó, a 800 grados Celsius esta disminuyó y a 600 grados Celsius no se detectó un comportamiento específico, siendo así una tendencia distinta para cada temperatura.

También se analizó el efecto de la temperatura en la recuperación de mercurio metálico, según figura 50. Se tiene que conforme aumenta la temperatura, el rango de variación de la masa de mercurio metálico recuperado

es mayor, siendo de esta manera la temperatura de 400 grados Celsius la que presentó los resultados menos dispersos con valores entre 21 y 25 miligramos. Cabe resaltar que a cada temperatura mayor, el valor mínimo de masa recuperada es menor.

El comportamiento descrito en el párrafo anterior, podría basarse en el enfriamiento del tubo de descarga hasta la temperatura de condensación del mercurio. A 400 grados Celsius el gradiente de temperatura es de 43 grados Celsius, la condensación ocurre rápidamente lo que se traduce en la poca variación de los valores obtenidos.

Caso contrario en los tratamientos de 600 y 800 grados Celsius en donde el gradiente de temperatura es más alto y el periodo de enfriamiento mayor. Anteriormente, se mencionó que a estas temperaturas la masa de mercurio recuperada variaba a valores menores y esto puede explicarse en base a la conductividad térmica del cuarzo (tubo de descarga) y del tungsteno (electrodo), superficies en donde el mercurio entra en contacto y se condensa.

Al comparar la conductividad térmica de ambos materiales, 174 watt por metro por kelvin para el tungsteno y 7,5 watt por metro por kelvin para el cuarzo, se espera que el tungsteno alcance la temperatura de condensación del mercurio más rápido provocando la deposición de este sobre su superficie. Sin embargo, debido a la gran área superficial de la ampolla de cuarzo la condensación también ocurre en las paredes de los tubos de descarga, y esto representa las menores masas recuperadas.

Debido a que no se observó un comportamiento específico del mercurio metálico recuperado en forma experimental, se realizó el análisis de varianza

para evaluar el efecto de la temperatura y el tiempo de duración del tratamiento térmico en la masa que se recuperó.

El análisis de varianza de dos factores determinó el efecto de las variables, temperatura y tiempo, en la masa de mercurio metálico recuperada. Para ambos casos se obtuvo que la masa recuperada a los diferentes tratamientos térmicos no es significativamente diferente entre sí, por lo que se concluye que la cantidad de mercurio metálico recuperado es independiente tanto de la temperatura como del tiempo de duración del tratamiento térmico.

De acuerdo a los resultados experimentales se determinó que la temperatura óptima es la de 400 grados Celsius, aunado a la conclusión del análisis de la varianza, se determinó que a esta temperatura y durante 30 minutos se obtienen las mejores condiciones de operación para la recuperación de mercurio metálico, además que se disminuye la duración del tratamiento así como el consumo de energía eléctrica de la mufla.

Posterior al tratamiento térmico y la recuperación de la gota de mercurio metálico, se evaluó la detección de mercurio, plomo y tungsteno residuales en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamiento químico. Este consistió en lavados con ácido nítrico, logrando la oxidación del mercurio que no se recuperó, o bien, que se depositó sobre los electrodos, así como la oxidación del tungsteno y el plomo que pudieran estar depositados en las paredes de cuarzo. La detección de los metales se realizó por técnicas analíticas instrumentales.

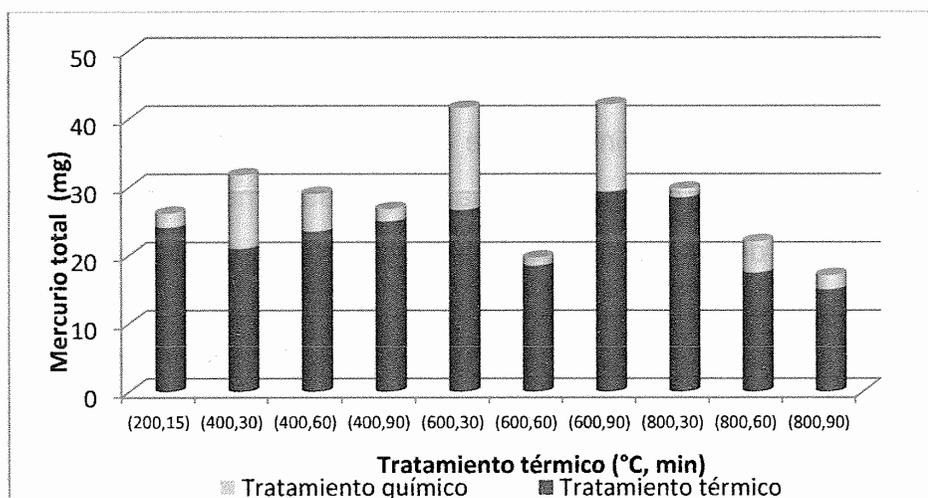
Las soluciones analizadas se prepararon con los lavados de los tubos de descarga correspondientes al triplicado realizado en cada tratamiento térmico, es decir, se obtuvo una única solución.

El mercurio se verificó por espectrometría de absorción atómica y este se detectó en todas las soluciones preparadas, por lo que se determinó que el mercurio no se recupera en su totalidad por el tratamiento térmico.

En la figura 51, se muestra la detección del mercurio en los tubos de descarga con la gota de mercurio formada, con ello se confirmó que el mercurio se adhiere a las paredes de cuarzo y se deposita sobre los electrodos de tungsteno, por lo que estos también deben de someterse al tratamiento térmico con las condiciones de operación seleccionadas.

Para los tubos de descarga sin gota de mercurio formada también se detectó mercurio en todas las soluciones, variando entre 1 hasta 15 miligramos. Debido a que la masa obtenida representa el promedio de los tres tubos de descarga no se puede inferir la contribución en mayor o menor grado de alguno de ellos.

Figura 53. **Mercurio total detectado en las ampollas de cuarzo**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 67, se comparó el mercurio cuantificado por el tratamiento químico y el tratamiento térmico. Se observó que no se tiene un patrón definido, los tratamientos térmicos que se realizaron a 600 grados Celsius a 30 y 90 minutos fueron los valores más altos tanto en el tratamiento térmico como en el químico, mientras que el de 60 minutos y el de 800 grados Celsius y 90 minutos fueron de los resultados más bajos para ambos tratamientos. Con ello, se confirma la variación de masa de mercurio que se agrega en la fabricación de las lámparas de mercurio y es por ello que la cantidad de mercurio total detectada difiere, aun así para la mayoría de tratamientos se obtiene la masa total entre 20 y 30 miligramos como se esperaba.

El plomo y el tungsteno fueron analizados mediante fluorescencia de rayos X, estos se evaluaron de forma cualitativa. En la tabla XXVII se presentan los resultados del análisis realizado, se obtuvieron resultados negativos en ambos casos, ya que ninguno de los metales fue detectado.

El tungsteno es el componente de los electrodos de los tubos de descarga, como se mencionó anteriormente, conforme el uso de la lámpara y debido a las temperaturas internas que se alcanzan, el tungsteno se evapora y se deposita en las paredes de la ampolla de cuarzo, sin embargo el resultado indica que la cantidad es mínima ya que aún con la unión de los volúmenes no fue detectado. Entonces el impacto negativo por este metal ocurre únicamente por la acumulación de los electrodos de tungsteno como desecho sólido.

El plomo es utilizado para mejorar las propiedades del cuarzo y por ello se buscó su detección, sin embargo, tampoco se detectó. Con ello, se determina que no existe impacto ambiental por plomo.

La detección de mercurio en los tubos de descarga posterior a su recuperación es suficiente para clasificar estos desechos de cuarzo como tóxicos por lo que no puede reutilizarse el material y este debe ser encapsulado y encriptado.

Posterior a la evaluación de la recuperación del mercurio metálico, se evaluó el proceso de inmovilización del mercurio mediante un procedimiento de amalgamamiento con cobre, este se analizó en distintas etapas con las cuales se eligieron las proporciones de los reactivos a utilizar.

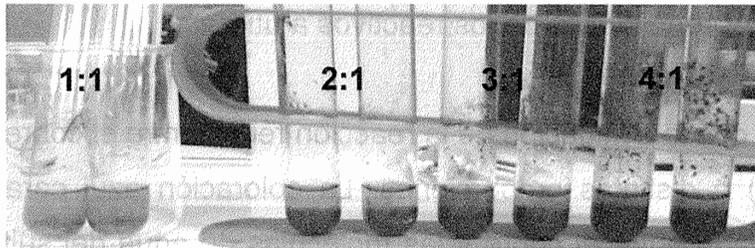
Se inició con la evaluación de la reacción redox entre el cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ) y zinc metálico ( $\text{Zn}^0$ ) a distintas proporciones. La coloración azul característica del complejo formado entre el cobre y las moléculas de agua del sulfato de cobre pentahidratado, se utilizó para la preparación de una curva de calibración en la que se relacionó linealmente la absorbancia con la concentración molar de la solución, como se observa en el Apéndice 4.

Las proporciones molares zinc: cobre que se evaluaron fueron, 1:1, 2:1, 3:1 y 4:1 y se determinó la cantidad de cobre que se redujo a un tiempo de reacción de 5 minutos. En la figura 52, se observa que a mayor proporción de zinc, el cobre se reduce en porcentajes mayores, siguiendo una tendencia cuadrática, según tabla XXVIII. Se estableció que el máximo porcentaje de cobre reducido se alcanza a una proporción de 3,5 moles de zinc por mol de cobre.

En la figura 68 se muestra que la intensidad de la coloración azul de las soluciones disminuye conforme la proporción es mayor. Tanto en la proporción 1:1 como en la 2:1 se observa dicha coloración, es decir presencia del complejo de cobre, por lo que el porcentaje de cobre reducido es menor, 41 y 82 por

ciento, respectivamente. Mientras que en las proporciones mayores 3:1 y 4:1 las soluciones son prácticamente incoloras que indica el agotamiento del cobre en su forma oxidada  $\text{Cu}^{+2}$  y un mayor porcentaje de reducción de cobre, cercano al 94 por ciento para ambos casos.

Figura 54. **Coloración de la solución de sulfato de cobre pentahidratada a los 5 minutos de reacción**



Fuente: LAFIQ, CII, FIUSAC.

Al considerar la constante de equilibrio de esta reacción redox de  $10^{37}$ , se esperaría que la reacción con proporción 1:1 ocurra casi en su totalidad, como ya se observó, esto no ocurre. Al comparar los resultados con el comportamiento esperado se considera que la misma reacción pudo interferir, ya que al agregar el zinc a la solución de sulfato de cobre pentahidratado, este se depositó en el fondo del tubo de ensayo. En la reacción, el cobre que se redujo, precipitó sobre el zinc lo que pudo crear una barrera física que impidió la interacción entre las especies, por lo tanto no se completó la reacción, y esto resultó en los porcentajes menores de reducción de cobre.

Además, la reacción no se efectuó con agitación constante, lo que habría eliminado la restricción mencionada anteriormente. La proporción que se seleccionó para la técnica de amalgamamiento es la de 2:1 que presentó un

porcentaje de reducción alto y que no requiere de un consumo mayor de zinc metálico.

La segunda etapa consistió en la determinación de la proporción molar cobre: mercurio para la formación de la amalgama en estado sólido. Este se realizó con la mínima proporción zinc: cobre evaluada, 1:1, para la reducción del cobre por reacción redox y se utilizaron concentraciones de sulfato de cobre pentahidratado de 0,25, 0,5, 0,75 y 1 de molaridad.

Según tabla XXIX, la amalgama de cobre sólida se formó en todas las proporciones con concentraciones de 0,75 y 1 molar. Para la preparación de la solución 1 molar se necesitó calentarla para disolver toda la sal, es por ello que se eligió la concentración de 0,81 molar que corresponde a la concentración de saturación. Esta proveerá la máxima cantidad de cobre sin requerir de la operación de calentamiento.

Se seleccionó la proporción molar cobre mercurio de 3:1 para garantizar que la amalgama que se forme sea sólida. Además, esta provee de condiciones adecuadas para los tubos de ensayo y el equipo de agitación. Dicha proporción establece que la cantidad de cobre que estará en la amalgama le conferirá las características de inmovilización requeridas.

La última etapa consistió en la evaluación y la validación del procedimiento de amalgamamiento con cobre, para esto se utilizó una proporción molar 2:1 de zinc: cobre y 3:1 cobre: mercurio. Se realizó el procedimiento en triplicado para el análisis de la repetitividad y tres analistas lo realizaron para evaluar la reproducibilidad.

Para facilitar el cálculo de la cantidad de reactivos a utilizar se establecieron dos factores correspondientes a las proporciones molares seleccionadas y que las relacionan con la masa de mercurio metálico a tratar. Para determinar el volumen de la solución de sulfato de cobre pentahidratado 0,81 molar que se requiere, se realizó la estequiometria según figura 69.

Figura 55. **Factor para determinar el volumen de la solución de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0,81 M requerido para el procedimiento de amalgamamiento**

$$V_{\text{solución}} \text{ (mL)} = \left[ x \text{ Hg (g)} * \frac{1 \text{ Hg (mol)}}{20059 \text{ Hg (g)}} * \frac{3 \text{ Cu (mol)}}{1 \text{ Hg (mol)}} * \frac{1 \text{ (L)}}{0,81 \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O (mol)}} * \frac{1000 \text{ (mL)}}{1 \text{ (L)}} \right] = 18,46 * \text{Hg(g)}$$

Fuente: elaboración propia.

El factor para determinar la cantidad de zinc metálico necesario se determinó con la estequiometria que se muestra en la figura 70.

Figura 56. **Factor para determinar la masa de zinc metálico requerida para el procedimiento de amalgamamiento**

$$\text{Zn (g)} = x \text{ Hg (g)} * \frac{1 \text{ Hg (mol)}}{20059 \text{ Hg (g)}} * \frac{3 \text{ Cu (mol)}}{1 \text{ Hg (mol)}} * \frac{2 \text{ Zn (mol)}}{1 \text{ Cu (mol)}} * \frac{65,37 \text{ (g)}}{1 \text{ Zn (mol)}} = 1,96 * \text{Hg(g)}$$

Fuente: elaboración propia.

Se tomó una muestra de mercurio metálico entre 200 y 300 miligramos, que al relacionarlo con el mercurio recuperado por el tratamiento térmico corresponde a la masa obtenida de 10 tubos de descarga (ampollas de cuarzo). Este se agregó en el volumen de la solución saturada de sulfato de cobre

pentahidratado y por último se agregó el zinc metálico, ambos de acuerdo a la proporción molar que se eligió. Se mantuvo en agitación durante todo el procedimiento mediante un agitador rotativo, figura 31.

El procedimiento se ejecutó durante diez minutos y al finalizar se obtuvo un desecho sólido que está conformado por la amalgama de cobre y el zinc metálico en exceso. Se observó la formación de la amalgama de cobre sólida en todas las repeticiones realizadas, en la figura 53 se muestra la amalgama sólida que se obtuvo.

Se obtuvo un resultado que llamó la atención, ya que el cobre se redujo en su totalidad, a diferencia, del porcentaje de reducción obtenido en la evaluación de la reacción redox de un 82 por ciento. Esto se atribuye a dos factores, el primero la constante agitación a la que se sometió el procedimiento y segundo a la reacción de amalgamamiento.

El cobre al reducirse se depositó sobre el mercurio y reaccionó, formando la amalgama, este se consumió dentro de la solución lo que pudo desplazar el equilibrio de la reacción en dirección de los productos y por ello obtener el porcentaje de reducción cercano al cien por ciento. Además, la agitación constante permitió la interacción uniforme de las especies en todo el tiempo de reacción.

El desecho sólido generado se filtró para su evaluación y también se analizó la solución remanente. En la tabla XXXI, se muestran los resultados. Como era de esperarse la cantidad de cobre detectado es muy pobre, mientras que la de zinc es mucho mayor, por lo que la solución filtrada es ahora una solución predominantemente de sulfato de zinc heptahidratado. Todos estos desechos líquidos deben ser tratados, por lo que se recomienda la evaporación

del agua para obtener las sales, sulfatos de cobre y zinc, en estado sólido y de esa manera encapsularlas con el resto de los desechos que se generan.

También se analizó la presencia de mercurio, de esta forma se evaluó si todo el mercurio agregado al inicio se inmovilizó. De acuerdo a la tabla XXXI, se obtuvo un valor promedio de 0,64 microgramos lo que representa una mínima cantidad de mercurio oxidada y no amalgamada.

De acuerdo a los balances de masa, se obtuvieron los moles de cobre y de mercurio que en la amalgama y conforme la tabla XXXII, se obtienen los resultados de la proporción experimental  $Cu_x:Hg_y$  para cada analista, obteniendo valores muy cercanos a la proporción teórica de 3:1, se determinó que los porcentajes de error no superan el 6 por ciento en exactitud.

La proporción experimental promedio obtenida fue de 2,89 moles de cobre por cada mol de mercurio, la representación química se observa en la figura 54. Dentro de este porcentaje están contenidos los errores propios de los métodos de cuantificación utilizados, además, de los tratamientos matemáticos realizados para su determinación.

El parámetro que indica el rendimiento del procedimiento de amalgamamiento es el porcentaje de mercurio que se inmovilizó. Como se mencionó anteriormente, el mercurio detectado en la solución filtrada tuvo un valor promedio de 0,64 microgramos, lo que nos indica que el mercurio se amalgamó en un alto porcentaje, lo cual se refleja en la tabla XXXIII, donde para cada analista se obtuvo un 99,99 por ciento de mercurio amalgamado. Esto permite establecer que el método cumple con el objetivo de inmovilizar al mercurio.

Se utilizó tanto la proporción experimental de la amalgama de cobre como el porcentaje de inmovilización del mercurio como los parámetros de evaluación de la repetitividad y reproducibilidad del procedimiento. La repetitividad se evaluó mediante el coeficiente de variación para ambos parámetros. Se determinó que valores menores al 10 por ciento representan poca dispersión entre los resultados, siendo este un parámetro de aceptación de los mismos.

En el Apéndice 4, se observa que los coeficientes de variación en la proporción experimental para cada analista son 0,36, 5,85 y 0,61 por ciento, cumpliendo con el parámetro establecido, mientras que para el porcentaje de inmovilización se obtuvieron valores aproximados al 0, Conforme a estos resultados se concluye que el procedimiento de amalgamamiento cumple con el parámetro de repetitividad, con la metodología y las condiciones evaluadas.

La reproducibilidad se evaluó a través de la realización del análisis de la varianza de los resultados entre los analistas, de igual forma, para los dos parámetros que se mencionaron anteriormente. Se inició con el análisis de la varianza de la proporción experimental obteniendo como resultado un valor de F de 0,96 valor inferior al F teórico, por lo que se acepta que no existen diferencias significativas en las proporciones experimentales calculadas entre todos los analistas. Y al evaluar el porcentaje de inmovilización se obtuvo un valor de 3,25 lo que indica también que no existen diferencias significativas entre los resultados.

Con ello se comprueba la reproducibilidad y repetitividad del procedimiento de amalgamamiento, que lo hace válido a ejecutarse por cualquier analista bajo las condiciones establecidas, en especial la masa de mercurio de entre 200 y 300 miligramos.

El desecho sólido está constituido, como se mencionó anteriormente del zinc metálico en exceso y de la amalgama de cobre producida y se determinó mediante balances de masa la proporción de estos. Inicialmente se taró la masa del desecho, luego se lavó con ácido clorhídrico al 37 por ciento con lo cual se oxidó todo el zinc que se agregó en exceso en una reacción redox con el ion hidronio como se observa en la figura 23. El sólido que no se oxidó, se pesó y dicha masa representa la cantidad de amalgama de cobre producida.

En la tabla XXX, se tiene la masa del desecho sólido, así como del zinc metálico y la amalgama de cobre promedio en el procedimiento de amalgamamiento producido por cada analista. Sin embargo, estos valores no son comparables debido a que dependen de la cantidad de mercurio agregada para cada repetición.

Se determinó, entonces, que para cada proceso de inmovilización, es decir, el tratamiento de 10 tubos de descarga se genera en promedio  $848,23 \pm 63,44$  miligramos de desecho sólido. Este desecho se debe juntar con el resto de desechos que serán encapsulados y encriptados para su posterior confinamiento.

La figura 55 muestra el porcentaje en masa del zinc elemental y de la amalgama de cobre en el desecho sólido, siendo estos parámetros comparables entre analistas y que permiten establecer una proporción experimental promedio generada por el procedimiento de amalgamamiento del mercurio con cobre.

Se observa que para los tres analistas la masa de la amalgama de cobre es mayor a la del zinc en exceso. Siendo los porcentajes menos variados los de los analistas 1 y 3, mientras que el analista 2 obtuvo ambos porcentajes en

masa en valores semejantes, 48 por ciento de zinc metálico y 52 por ciento de la amalgama de cobre. Sin embargo, al realizar el análisis de varianza se concluyó que los resultados no presentan diferencias significativas entre analistas.

Al evaluar la cantidad de zinc en exceso, con respecto de la masa agregada, se obtienen valores altos para los tres analistas, 70, 79 y 77 por ciento, respectivamente, lo que sugeriría la evaluación del procedimiento en una proporción menor a la que se utilizó, ya que la cantidad de zinc que garantiza la formación de la amalgama de cobre sólida no supera el 20 por ciento de lo agregado inicialmente.

Se concluye que la proporción experimental del desecho está conformado por un  $54,48 \pm 4,34$  por ciento de amalgama de cobre y un  $45,52 \pm 4,34$  por ciento de zinc metálico, siendo estos valores importantes para el registro de los desechos sólidos encriptados de todo el proceso recuperación y tratamiento del mercurio metálico.

En base a los resultados obtenidos en la experimentación de esta investigación se logró desarrollar el Procedimiento Técnico de Recuperación y Tratamiento del Mercurio Metálico Proveniente de los Tubos de Descarga (Ampolla de Cuarzo) de las Lámparas de Alta Presión, en donde se establece la metodología, paso a paso para la recuperación y el tratamiento del desecho líquido tóxico proveniente de las lámparas de mercurio del alumbrado público.



## CONCLUSIONES

1. Se desarrolló un procedimiento técnico efectivo para la recuperación y tratamiento del mercurio contenido en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) de las luminarias de alta presión.
2. El procedimiento experimental para el tratamiento térmico de recuperación de mercurio metálico fue efectivo, las condiciones operatorias recomendadas son 400 grados Celsius durante 30 minutos.
3. En general, se verificó la existencia de mercurio residual en los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) posterior a la recuperación en cualquiera de los tratamientos térmicos evaluados.
4. No se detectó plomo y tungsteno residual en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico.
5. El procedimiento de amalgamamiento con cobre fue efectivo para la inmovilización del mercurio metálico procedente de los tratamientos térmicos.
6. Las proporciones molares experimentales para el procedimiento de inmovilización por amalgamamiento con cobre fueron 3:1 de Cu:Hg y 2:1 de Zn:Cu.

7. El procedimiento de amalgamamiento con cobre permitió que el mercurio metálico procedente de los tratamientos térmicos se inmovilizara en un 99,99 por ciento.
8. La evaluación de zinc metálico como agente reductor en el proceso de amalgamamiento experimental realizado, estableció un  $75,19 \pm 4,42$  por ciento en exceso.

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar una proporción molar menor de zinc: cobre en el procedimiento de amalgamamiento con cobre para reducir la cantidad de zinc en exceso.
2. Evaluar un procedimiento de tratamiento de los desechos líquidos generados en el procedimiento de amalgamamiento con cobre.
3. Evaluar la cinética de la reacción de amalgamamiento del mercurio con cobre para la determinación de la proporción cobre: mercurio exacta y disminuir el excedente de reactivos utilizados.
4. Evaluar el impacto ambiental del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante el procedimiento de amalgamamiento con cobre.
5. Difundir el procedimiento técnico de recuperación y tratamiento del mercurio contenido en los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) provenientes de las lámparas de alta presión del alumbrado público.

## QUESTION 10

10. The following table shows the number of employees in each of the departments of a company. The employees are categorized by gender and by department.
- | Department      | Male | Female |
|-----------------|------|--------|
| Accounting      | 12   | 18     |
| Marketing       | 15   | 20     |
| Operations      | 10   | 15     |
| Human Resources | 8    | 12     |
| Finance         | 6    | 10     |
| IT              | 4    | 6      |
- 10.1 Write down the probability that a randomly selected employee is female.
- 10.2 Write down the probability that a randomly selected employee is male and works in the Marketing department.
- 10.3 Write down the probability that a randomly selected employee is female and works in the Accounting department.
- 10.4 Write down the probability that a randomly selected employee is male and works in the Finance department.
- 10.5 Write down the probability that a randomly selected employee is female and works in the IT department.
- 10.6 Write down the probability that a randomly selected employee is male and works in the Human Resources department.
- 10.7 Write down the probability that a randomly selected employee is female and works in the Operations department.
- 10.8 Write down the probability that a randomly selected employee is male and works in the Marketing department.
- 10.9 Write down the probability that a randomly selected employee is female and works in the Finance department.
- 10.10 Write down the probability that a randomly selected employee is male and works in the Accounting department.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALBIANO, Nelson. *Toxicología laboral: criterios para la vigilancia de los trabajadores expuestos a sustancias químicas peligrosas* [en línea]. Instituto de Previsión Social. Paraguay. <<http://www.ips.gov.py/principal/varios/transparencia/TOXICOLOGIALABORAL.pdf>>. [Consulta: 3 de noviembre de 2012].
2. ARANDA, Beatriz. *Constitución de las aleaciones* [en línea]. Universidad de Huelva, España. <<http://www.uhu.es/beatriz.aranda/apuntesciemat/TEMA%2062.pdf>>. [Consulta: 3 de noviembre de 2012].
3. ATKINS, Peter William. *Principios de química: los caminos de descubrimiento*. 3a ed. Argentina: Medica Panamericana, 2006. 990 p. ISBN: 95-006-0080-3.
4. BERG, Jeremy Mark. *Bioquímica*. 6a ed. Barcelona: Reverte, 2005. 1026 p.
5. CASTELLS, Xavier. *Reciclaje y tratamiento de residuos diversos: reciclaje de residuos industriales*. México: Díaz de Santos, 2012. 125 p. ISBN: 84-996-93741.
6. CHANG, Raymond. *Química*. 7a ed. Colombia: McGraw-Hill, 2002. 1004 p.

7. CORREA GÓMEZ, Javier. *Estrategias de control en lámparas de alta presión para la eliminación de resonancias acústicas*. Dirección: Dr. Mario Ponce y Dr. Jaime Arau. Tesis de Doctorado en Electrónica de Potencia. Morelos, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). 2004. 266 p.
8. DE LAS CASAS AYALA, José María; GONZALEZ, Rafael; PUENTE, Raquel. *Curso de iluminación integrada en la arquitectura*. Madrid: Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1991. 308 p. ISBN: 84-774-0044-X
9. GAONA MARTÍNEZ, Xavier. *El mercurio como contaminante global: desarrollo de metodología para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente* [en línea]. Tesis de Doctorado, Química. Universidad Autónoma de Barcelona, Unidad de Química Analítica. Barcelona. 2004. <<http://grupsderecerca.uab.cat/gts/sites/grupsderecerca.uab.cat/gts/files/TESIS%20XG.pdf>>. [Consulta: octubre de 2012].
10. GARCÍA FERNANDEZ, Javier. *Luminotecnia: iluminación de interiores y exteriores* [en línea]. Dirección: Oriol Boix Aragonés. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Energía Eléctrica, 2012. <<http://edison.upc.edu/curs/llum/lampara-luminaria/lampara-descarga.html>>. [Consulta: 30 de octubre de 2012].

11. GOMEZ, Robinson. *Manejo integral de lámparas de mercurio* [en línea]. <[http://manejointegraldelamparasdemercurio.blogspot.com/2011\\_08\\_01\\_archive.html](http://manejointegraldelamparasdemercurio.blogspot.com/2011_08_01_archive.html)>. [Consulta: 29 de octubre de 2012].
12. HEREDIA, Antonio José. *Análisis didáctico de los diferentes tipos de lámparas incandescentes y de descarga* [en línea]. Central Sindical Independiente y de Funcionarios. Málaga, España. <[http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod\\_ense/revista/pdf/Numero\\_21/ANTONIO%20JOSE\\_%20HEREDIA%20SOTO\\_1.pdf](http://www.csi-csif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_21/ANTONIO%20JOSE_%20HEREDIA%20SOTO_1.pdf)>. [Consulta: noviembre de 2012].
13. HERNÁNDEZ, Gilberto. *Componentes geoquímicos del mercurio y gas radón en los sistemas terrestres al sur de la sierra gorda de Querétaro, México* [en línea]. México: Universidad Nacional Autónoma de México. 2010. <[http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/bol-e\\_mercurio.pdf](http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/bol-e_mercurio.pdf)>. [Consulta: noviembre de 2012]
14. HOOKER, J.D. *The mercury vapour lamp* [en línea]. <<http://www.lamptech.co.uk/Documents/M2%20Pressure.htm>>. [Consulta: 2 de noviembre de 2012].
15. ISLAS, Benjamín. *Conceptos para el desarrollo básico de arreglos de tuberías en plantas industriales bajo la norma ASME/ANSI* [en línea]. Dirección: M. C. Juan José Marínez. Tesis de Licenciatura. México: Ingeniería Mecánica. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. 2009. <<http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/handle/123456789/4594>>. [Consulta: noviembre de 2012].

16. JARA, Ramírez. *Elementos base para la gestión ambiental del mercurio en Chile*. Dirección: Sra. Lilian Veas Acuña. Tesis de Licenciatura. Chile: Ingeniería Civil Química. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. 2007. 146 p.
17. O'DONELL, Beatriz. *Fuentes luminosas*. En: manual de iluminación eficiente [en línea]. Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, 2006. <<http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap04.pdf>>. [Consulta: noviembre de 2012]
18. PADILLA, Arrate; RODRÍGUEZ, Nieves; MARTÍNEZ, Amaia. *Plomo, protocolo de vigilancia sanitaria específica* [en línea]. Comisión de Salud Pública, Consejo Interterritorial del Sistema Nacional de Salud e Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborables. Madrid, 1999. <[http://www.zerbitzu-orokorrak.ehu.es/p258-shprevct/eu/contenidos/informacion/sp\\_legislacion/eu\\_leg\\_upv/adjuntos/PLOMO.pdf](http://www.zerbitzu-orokorrak.ehu.es/p258-shprevct/eu/contenidos/informacion/sp_legislacion/eu_leg_upv/adjuntos/PLOMO.pdf)>. [Consulta: 30 de octubre de 2012]
19. PNUMA. *Evaluación mundial sobre el mercurio* [en línea]. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Productos Químicos. Ginebra, Suiza: PNUMA, 2005. <<http://www.chem.unep.ch/mercury/GMA%20in%20F%20and%20S/final-assessment-report-Nov05-Spanish.pdf>>. [Consulta: noviembre de 2012]
20. SKOOG, Douglas; HOLLER, James; CROUCH, Stanley. *Principios de análisis instrumental*. Anzures, María Bruna (Trad). 6a ed. México: Cengage Learning, 2008. 1038 p. ISBN: 97-068-6829-1.

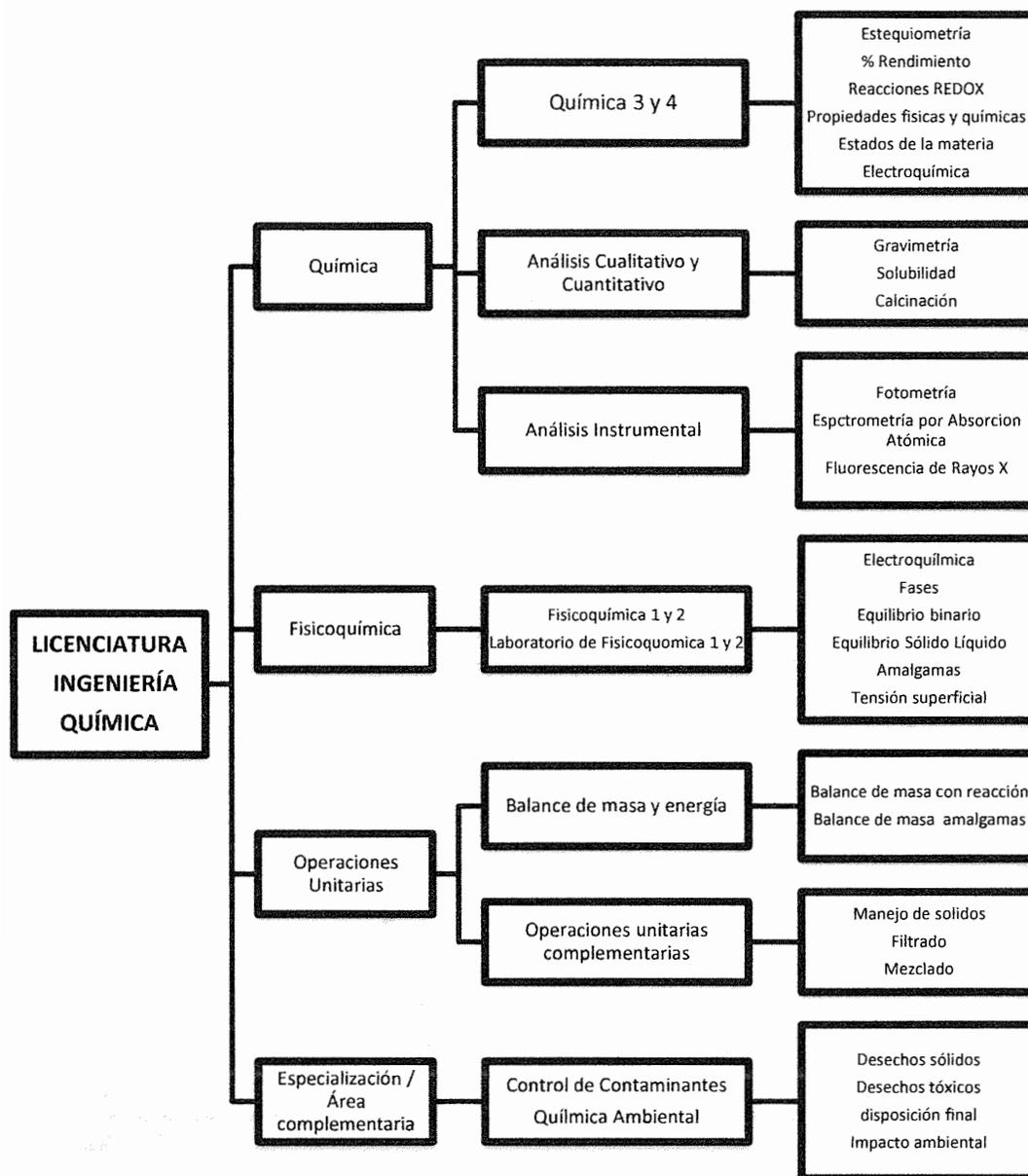
21. SUNTECÚN CASTELLANOS, Alex. *Tratamiento primario desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las municipalidades de Guatemala*. Tesis de Maestría en Ciencias y Gestión Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado, 2010. 88p.
22. TAMBUTTI, Romilio; MUÑOZ, Héctor. *Introducción a la física y la química*. 4a ed. México: Limusa, 2005. 275 p. ISBN: 968-18-5866-2.
23. TEHERÁN, Joaquín. *Los metales tóxicos y su eliminación* [en línea]. Cartagena, Colombia. [ref. 5 de octubre de 2010] Disponible en web: <<http://www.actiweb.es/qisoma/articulos.html>>.
24. UNIVERSIDAD DE NAVARRA, *Principales tipos de lámparas* [en línea]. España. <[http://www.unav.es/ted/manualted/manual\\_archivos/luz9\\_main.htm](http://www.unav.es/ted/manualted/manual_archivos/luz9_main.htm)>. [Consulta: 3 de noviembre de 2012].
25. WALTON, Harold; REYES, Jorge. *Análisis químico e instrumental moderno*. España: Reverté, 1983. 405 p. ISBN: 84-291-7519-9.



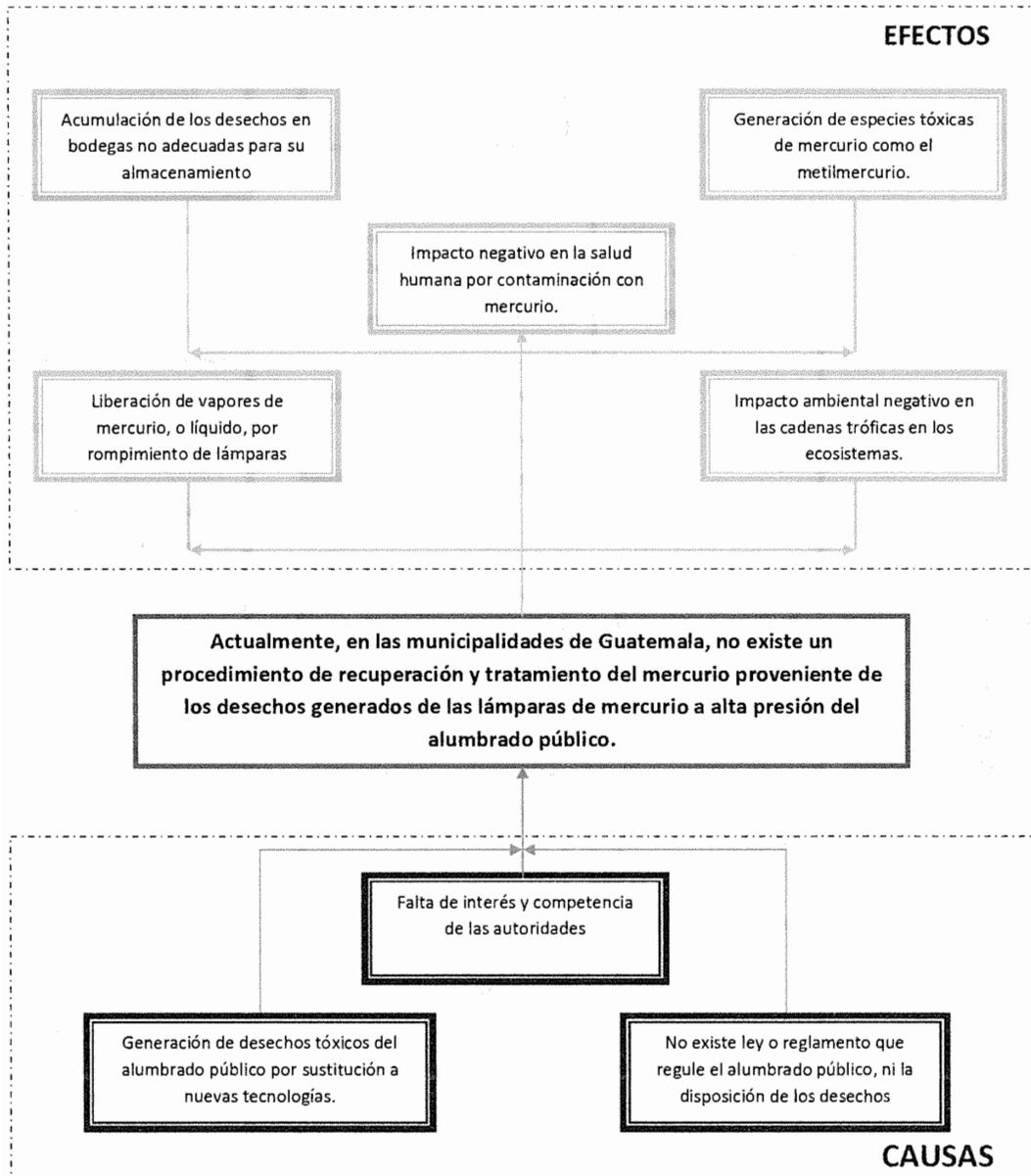
## APÉNDICES

156

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



## Apéndice 2. Árbol de problemas



### Apéndice 3. Análisis estadístico

- Coeficiente de variación
  - Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga mediante tratamientos térmicos.

#### Evaluación del mercurio metálico recuperado de los tubos de descarga quemados con presencia de gota de mercurio metálico

Recuperación mercurio metálico por tratamientos térmico (mg)	Duración de tratamiento térmico (°C, min)
	(200, 15)
Promedio	24,11
Desviación Estándar	2,85
Coeficiente de Variación	11,81%

#### Evaluación de la recuperación de mercurio metálico de los tubos de descarga mediante tratamiento térmicos

Recuperación Hg° por tratamientos térmico (mg)		Duración de tratamiento térmico (min)			
		30	60	90	
Temperatura de tratamiento térmico (°C)	400	Promedio	21,00	23,50	25,00
		Desviación Estándar	2,83	6,36	4,24
		Coeficiente de Variación	13,47	27,08	16,97
	600	Promedio	26,67	18,50	29,33
		Desviación Estándar	3,06	0,50	2,08
		Coeficiente de Variación	11,46	0,29	7,10
	800	Promedio	28,50	17,47	15,00
		Desviación Estándar	2,26	4,06	6,51
		Coeficiente de Variación	7,94	23,26	43,37

- Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga mediante tratamientos térmicos.
- Evaluación de la reacción redox a dos fases entre el cobre  $[Cu^{+2}] = 0,814 \text{ M}$  y zinc elemental ( $Zn^0$ ) para un tiempo de reacción de 5 minutos.

#### Puntos promedio de la curva de calibración

No.	$[Cu^{+2}]$	Analista 1	Analista 2	Promedio	Desviación Estándar	CV (%)
0	0,81	2,90	2,90	2,90	0,004	0,14
1	0,41	1,58	1,57	1,57	0,008	0,51
2	0,20	0,81	0,80	0,81	0,012	1,48
3	0,10	0,43	0,42	0,42	0,005	1,19
4	0,05	0,33	0,23	0,28	0,070	25,00
5	0,03	0,13	0,13	0,13	0,001	0,77
6	0,01	0,09	0,08	0,09	0,002	2,22
7	0,01	0,07	0,06	0,06	0,003	5,00

Porcentaje de cobre reducido en la reacción redox entre el cobre  $[Cu^{+2}] = 0,814 \text{ M}$  y zinc ( $Zn^0$ ) para un tiempo de reacción de 5 min

Proporción zinc: cobre (Zn: Cu)	Promedio	Desviación estándar	CV (%)
(1:1)	41,01	1,77	4,32
(2:1)	82,07	0,98	1,20
(3:1)	94,47	0,71	0,75
(4:1)	93,77	0,76	0,81

- Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento.

La repetitividad del procedimiento de amalgamamiento con cobre, se evaluó realizando el análisis del coeficiente de variación para cada analista según dos factores la proporción molar cobre: mercurio y el porcentaje de mercurio inmovilizado. La reproducibilidad se obtuvo del coeficiente de variación obtenido al evaluar los resultados entre analistas. Se estableció que valores menores al 10 por ciento representan poca dispersión entre los resultados, siendo este un parámetro de aceptación de los mismos.

**Proporción molar de cobre: mercurio experimental en el procedimiento de amalgamamiento.**

<b>Analista</b>	<b>Proporción Experimental</b> <i>Cu<sub>x</sub>Hg<sub>y</sub></i>	<b>Desviación estándar</b> <i>Cu<sub>x</sub>:Hg<sub>y</sub></i>	<b>CV (%)</b>	<b>% Error de Exactitud</b> <i>Cu<sub>3,00</sub>Hg<sub>1,00</sub></i>
<b>1</b>	2,93	0,01	<b>0,36</b>	<b>2,33</b>
<b>2</b>	2,83	0,17	<b>5,85</b>	<b>5,75</b>
<b>3</b>	2,90	0,02	<b>0,61</b>	<b>3,39</b>

**Proporción molar de cobre: mercurio experimental en el  
procedimiento de amalgamamiento**

<b>Analista</b>	<b>Proporción experimental <i>Cu<sub>x</sub>Hg<sub>y</sub></i></b>
1	2,93
2	2,83
3	2,90
<b>Promedio</b>	<b>2,89</b>
<b>Desviación</b>	<b>0,05</b>
<b>CV (%)</b>	<b>1,78</b>

Se observa que el procedimiento si cumple con el parámetro establecido siendo los coeficientes de variación para los tres analistas menores al 10 por ciento por lo que se acepta que este cumple con el parámetro de repetitividad. De la misma forma el coeficiente de variación es del 1,78 por ciento entre los analistas por lo que de acuerdo a este parámetro el procedimiento es reproducible.

- Determinación del porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento.

**Porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento**

<b>Analista</b>	<b>% Mercurio inmovilizado</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>CV (%)</b>
1	99,99	0,00	<b>0,00</b>
2	99,99	0,00	<b>0,00</b>
3	99,99	0,00	<b>0,00</b>

### Porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento

<b>Analista</b>	<b>% Mercurio inmovilizado</b>
1	99,99
2	99,99
3	99,99
<b>Promedio</b>	99,99
<b>Desviación</b>	0,00
<b>Coefficiente de Variación (%)</b>	<b>0%</b>

Utilizando este factor se observa que el método es repetible y reproducible, para todos los casos se obtuvo un coeficiente de variación aproximado a 0 por ciento.

- Determinación mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento.

### Proporción másica experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento Analista 1

<b>Analista</b>	<b>% Masa amalgama de cobre</b>	<b>% Masa de zinc elemental</b>
<b>Promedio A1</b>	5,46	43,54
<b>Desviación estándar A1</b>	1,06	1,06
<b>Coefficiente de Variación (%)</b>	1,87	2,42

**Proporción másica experimental del desecho generado en el  
procedimiento de amalgamamiento Analista 2 y 3**

<b>Analista</b>	<b>% Masa amalgama de cobre</b>	<b>% Masa de zinc elemental</b>
<b>Promedio A2</b>	5,66	48,34
<b>Desviación estándar A2</b>	5,31	5,31
<b>Coefficiente de Variación (%)</b>	10,27	10,98
<b>Promedio A3</b>	55,33	44,67
<b>Desviación estándar A3</b>	5,22	5,22
<b>Coefficiente de Variación (%)</b>	9,44	11,69
<b>Promedio Analistas</b>	<b>54,48</b>	<b>45,52</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>4,34</b>	<b>4,34</b>
<b>Coefficiente de Variación (%)</b>	<b>7,96</b>	<b>9,54</b>

- Análisis de varianza
  - Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamientos térmicos en función de la temperatura y el tiempo de duración.

Para la evaluación de la recuperación de mercurio metálico se realizó un análisis de varianza para probar alguna de las hipótesis siguientes.

**H<sub>01</sub>:** La cantidad de mercurio recuperado por tratamiento térmico de los tubos de descarga (ampolla de cuarzo) no varía en función de la temperatura y el tiempo de residencia en la mufla.

**H<sub>1</sub>:** La cantidad de mercurio recuperado por tratamiento térmico de los tubos de descarga (ampolla de cuarzo) varía en función de la temperatura y el tiempo de residencia en la mufla.

Se realizó el análisis de varianza de un factor para la evaluación, inicialmente, del efecto de la temperatura del tratamiento térmico en la recuperación de mercurio, luego para el efecto del tiempo de duración del tratamiento. Por último, se realizó un análisis de varianza de dos factores para evaluar el efecto combinado en la recuperación de mercurio metálico.

**Análisis de la varianza para la recuperación de mercurio con tratamiento de 30 minutos y variando la temperatura del tratamiento térmico**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	F <sub>tabulada</sub>	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	62,55	2,00	31,27	3,94	0,1135	6,94	0,05
<b>Analista</b>	62,55	2,00	31,27	3,94	0,1135	6,94	0,05
<b>Error</b>	31,79	4,00	7,95				
<b>Total</b>	94,33	6,00					

**Prueba LSD-Fisher recuperación de mercurio con tratamiento de 30 minutos y variando la temperatura con  $\alpha=0,05$**

Temperatura	Medias	n	E.E.	
<b>400</b>	21,00	2,00	1,99	A
<b>600</b>	26,67	3,00	1,99	A
<b>800</b>	28,50	2,00	1,99	A

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Análisis de la varianza para la recuperación de mercurio con tratamiento de 60 minutos y variando la temperatura del tratamiento térmico**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	F <sub>tabulada</sub>	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	46,40	2,00	23,20	1,25	0,38	6,94	0,05
<b>Analista</b>	46,40	2,00	23,20	1,25	0,38	6,94	0,05
<b>Error</b>	74,01	4,00	18,50				
<b>Total</b>	120,41	6,00					

**Prueba LSD-Fisher recuperación de mercurio con tratamiento de 60 minutos y variando la temperatura con  $\alpha=0,05$**

Temperatura	Medias	n	E.E.	
800	17,47	3,00	2,48	A
600	18,50	2,00	3,04	A
400	23,50	2,00	3,04	A

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Análisis de la varianza para la recuperación de mercurio con tratamiento de 90 minutos y variando la temperatura del tratamiento térmico**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	F <sub>tabulada</sub>	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	249,33	2,00	124,67	7,23	0,047	6,94	0,05
<b>Analista</b>	249,33	2,00	124,67	7,23	0,047	6,94	0,05
<b>Error</b>	68,99	4,00	17,25				
<b>Total</b>	318,32	6,00					

**Prueba LSD-Fisher recuperación de mercurio con tratamiento de 90 minutos y variando la temperatura con  $\alpha=0,05$  y DMS=6,77**

Temperatura	Medias	n	E.E.		
800	15	3	1,96	A	
400	25	3	1,96	A	B
600	29,33	3	1,96		B

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

En la evaluación del efecto de la temperatura del tratamiento térmico en la recuperación del mercurio metálico se determinó que para tratamientos cortos de 30 y 60 minutos la temperatura no afecta la cantidad de mercurio que se puede recuperar por lo que se acepta la hipótesis nula, a diferencia del tratamiento más largo de 90 minutos en donde la temperatura si afecta en la cantidad de mercurio metálico recuperada.

Con la prueba de LSD- Fisher se observa que cuando el tratamiento dura 90 minutos no existe diferencia significativa entre las temperaturas de 400 y 600 grados Celsius.

**Análisis de la varianza para la recuperación de mercurio con tratamiento térmico a 400 grados Celsius y variando el tiempo de duración**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	F <sub>tabulada</sub>	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	16,33	2,00	8,17	0,37	0,719	18,50	0,05
<b>Analista</b>	16,33	2,00	8,17	0,37	0,719	18,50	0,05
<b>Error</b>	66,50	3,00	22,17				
<b>Total</b>	82,83	5,00					

**Prueba LSD-Fisher recuperación de mercurio con tratamiento térmico a 400 grados Celsius y variando el tiempo de duración con  $\alpha=0,05$**

Temperatura	Medias	n	E.E.	
30	21,00	2,00	3,33	A
60	23,50	2,00	3,33	A
90	25,00	2,00	3,33	A

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Análisis de la varianza para la recuperación de mercurio con tratamiento térmico a 600 grados Celsius y variando el tiempo de duración**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	F <sub>tabulada</sub>	Nivel de significación
Modelo	146,04	2,00	73,02	13,12	0,0103	6,94	0,05
Analista	146,04	2,00	73,02	13,12	0,0103	6,94	0,05
Error	27,83	5,00	5,57				
Total	82,83	7,00					

**Prueba LSD-Fisher recuperación de mercurio con tratamiento térmico a 600 grados Celsius y variando el tiempo de duración con  $\alpha=0,05$**

Temperatura	Medias	n	E.E.	
60	18,50	2,00	1,67	A
30	26,67	3,00	1,36	B
90	29,33	3,00	1,36	B

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Análisis de la varianza para la recuperación de mercurio con tratamiento térmico a 800 grados Celsius y variando el tiempo de duración**

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor	F <sub>tabulada</sub>	Nivel de significación
<b>Modelo</b>	213,70	2,00	106,85	5,31	0,075	6,94	0,05
<b>Analista</b>	213,70	2,00	106,85	5,31	0,075	6,94	0,05
<b>Error</b>	80,45	4,00	20,11				
<b>Total</b>	294,15	6,00					

**Prueba LSD-Fisher recuperación de mercurio con tratamiento térmico a 800 grados Celsius y variando el tiempo de duración con  $\alpha=0,05$**

Temperatura	Medias	n	E.E.		
<b>90</b>	15,00	2,00	3,17	A	
<b>60</b>	17,47	3,00	2,59	A	B
<b>30</b>	28,50	2,00	3,17		B

\*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

En la evaluación del efecto del tiempo de duración del tratamiento térmico se obtuvo que este no afecta la cantidad de mercurio que se recupera cuando se trabaja a temperaturas de 400 y 800 grados Celsius, sin embargo, cuando el tratamiento se realiza a 600 grados Celsius el tiempo de duración si varía la masa recuperada del metal.

**Análisis de la varianza de dos factores de la recuperación de mercurio  
variando la temperatura y el tiempo de tratamiento térmico**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>	<b>F<sub>tabulada</sub></b>	<b>Nivel de significación</b>
<b>Modelo.</b>	226,87	4,00	56,72	2,04	0,14	3,81	0,05
<b>Tiempo</b>	104,94	2,00	52,47	1,88	0,18	3,81	0,05
<b>Temperatura</b>	87,14	2,00	43,57	1,56	0,24	3,81	0,05
<b>Error</b>	445,92	16,00	27,87				
<b>Total</b>	672,79	20,00					

Al comparar los valores de F calculado con el F tabulado y del p-valor con el nivel de significación se obtuvo que la cantidad de mercurio metálico recuperado no depende de la temperatura ni el tiempo de tratamiento, por lo que se acepta la hipótesis nula.

- Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento variando al analista que lo ejecuta.

Se evaluó la reproducibilidad del método al realizar el proceso de inmovilización del mercurio metálico variando al analista que lo ejecuta, las variables con las que se evaluó fue la proporción experimental de la amalgama producida y el porcentaje de mercurio inmovilizado, de manera, que se acepte alguna de las hipótesis siguientes.

**H<sub>03</sub>:** El proceso de inmovilización del mercurio por amalgamamiento no se ve afectado por la variación del analista que lo ejecute.

**H<sub>a</sub>:** El proceso de inmovilización del mercurio por amalgamamiento se ve afectado por la variación del analista que lo ejecute.

**Análisis de la varianza de la proporción experimental cobre: mercurio según el analista que ejecuta el procedimiento de amalgamamiento**

F.V.	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F	p	F tabulada	Nivel de significación
<b>Modelo.</b>	0,02	2	0,01	<b>0,96</b>	<b>0,435</b>	<b>6,94</b>	<b>0,05</b>
<b>Analista</b>	0,02	2	0,01	<b>0,96</b>	<b>0,435</b>	<b>6,94</b>	<b>0,05</b>
<b>Error</b>	0,05	6	0,01				
<b>Total</b>	0,07	8					

**Análisis de la varianza del porcentaje de mercurio inmovilizado en función al analista que ejecuta el procedimiento de amalgamamiento**

F.V.	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F	p	F tabulada	Nivel de significación
<b>Modelo.</b>	9,8E-12	2,00	4,9E-12	3,25	0,11	6,94	0,05
<b>Analista</b>	9,8E-12	2,00	4,9E-12	3,25	0,11	6,94	0,05
<b>Error</b>	9,1E-12	6,00	1,5E-12				
<b>Total</b>	1,9E-11	8,00					

Tanto en el análisis de varianza de la proporción molar experimental entre el cobre y mercurio como en el del porcentaje de inmovilización de mercurio se obtuvieron valores de p mayores al 0,05 por lo que se acepta la hipótesis nula, por lo tanto el procedimiento de amalgamamiento con cobre no se ve afectado por el analista que lo ejecute.

Además, de acuerdo a estas dos evaluaciones se concluye también que el método es reproducible al no existir diferencias significativas en los resultados obtenidos en ambos casos.

- Determinar mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento.

Para validar los porcentajes de zinc metálico y de la amalgama de cobre en el desecho sólido del procedimiento de amalgamamiento se realizó un análisis de varianza de un factor para cada uno de estos parámetros.

**Análisis de la varianza de la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento**

<b>F.V.</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	<b>F tabulada</b>	<b>Nivel de significación</b>
<b>Modelo.</b>	37,75	2	18,87	1	0,4214	6,94	0,05
<b>Analista</b>	37,75	2	18,87	1	0,4214	6,94	0,05
<b>Error</b>	113,07	6	18,84				
<b>Total</b>	150,81	8					

Se concluye que no existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por los diferentes analistas.

#### Apéndice 4. Datos calculados

- Evaluación de la recuperación de mercurio metálico procedente del tubo de descarga (ampolla de cuarzo) mediante tratamientos térmicos, en función de 4 temperaturas y 3 tiempos de duración del tratamiento.

#### Evaluación del mercurio metálico recuperado de los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) quemados con gota de mercurio formada

Recuperación mercurio metálico por tratamientos térmico (mg)		Duración de tratamiento térmico (min)
		<b>15</b>
Temperatura de tratamiento térmico (°C)	200	21
		21
		26
		23
		30
		26
		24
		23
		23
		Promedio
Desviación Estándar		<b>2,85</b>

**Evaluación del mercurio metálico recuperado de los tubos de descarga sin  
gota de mercurio formada mediante tratamientos térmicos a 3  
temperaturas y 3 tiempos de duración del tratamiento**

Recuperación de mercurio metálico por tratamientos térmicos (mg)		Duración de tratamiento térmico (min)		
		30	60	90
Temperatura de tratamiento térmico (°C)	400	19	0	28
		23	28	22
		0	19	0
	Promedio	<b>21,00</b>	<b>23,50</b>	<b>25,00</b>
	Desviación Estándar	<b>2,83</b>	<b>6,36</b>	<b>4,24</b>
	600	24	18	27
		26	19	30
		30	0	31
	Promedio	<b>26,67</b>	<b>18,50</b>	<b>29,33</b>
	Desviación Estándar	<b>3,06</b>	<b>0,71</b>	<b>2,08</b>
	800	0	21,7	19,6
		26,9	17,1	10,4
		30,1	13,6	0
	Promedio	<b>28,50</b>	<b>17,47</b>	<b>15,00</b>
	Desviación Estándar	<b>2,26</b>	<b>4,06</b>	<b>6,51</b>

- Evaluación del tratamiento químico para la detección de mercurio, plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos.

**Mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) con gota de mercurio formada**

Hgr: Mercurio remanente en el tubo de descarga		Duración de tratamiento térmico (min)		
		15		
		Hgr (mg/L)	Hgr (mg)	Hgr (mg/ampolla)
Temperatura de tratamiento térmico (°C)	200	68,81	6,88	2,29
		43,94	4,39	1,46
		70,99	7,10	2,37
Promedio		<b>61,25</b>	<b>61,25</b>	<b>6,12</b>
Desviación Estándar		<b>15,03</b>	<b>15,03</b>	<b>1,50</b>

**Mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico de 400°C**

Hgr : Mercurio remanente en el tubo de descarga (ampollas de cuarzo)		Temperatura de Tratamiento Térmico (°C)		
		400		
		Hgr (mg/L)	Hgr (mg)	Hgr (mg/ampolla)
Duración de tratamiento térmico (min)	30	322,77	32,28	10,76
	60	166,59	16,66	5,55
	90	53,3	5,33	1,78

**Mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico de 600 grados Celsius**

Hgr : Mercurio remanente en el tubo de descarga (ampollas de cuarzo)		Temperatura de Tratamiento Térmico (°C)		
		600		
		Hgr (mg/L)	Hgr (mg)	Hgr (mg/ampolla)
Duración de tratamiento térmico (min)	30	449,01	44,90	14,97
	60	34,46	3,45	1,15
	90	383,96	38,40	12,80

**Mercurio remanente en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico de 800 grados Celsius**

Hgr : Mercurio remanente en el tubo de descarga (ampollas de cuarzo)		Temperatura de Tratamiento Térmico (°C)		
		800		
		Hgr (mg/L)	Hgr (mg)	Hgr (mg/ampolla)
Duración de tratamiento térmico (min)	30	37,34	3,73	1,24
	60	137,27	13,73	4,58
	90	62,14	6,21	2,07

**Plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (ampolla de cuarzo) posterior a los tratamientos térmicos**

Pbr y Wr: Plomo y tungsteno remanentes en el tubo de descarga (mg/L)	Especie analizada	
	Plomo	Tungsteno
Resultado de la detección	-	-

- Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento.
  - Elaboración de la curva de calibración absorbancia - concentración molar de la solución de sulfato de cobre pentahidratado.

### Puntos de la curva de calibración analista 1

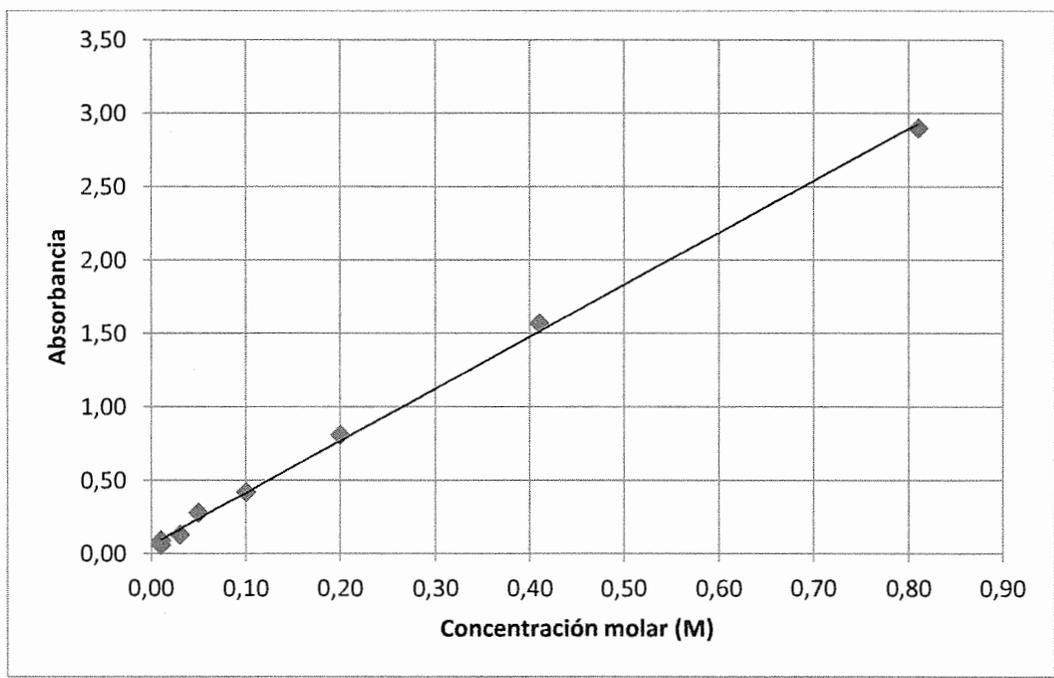
<b>ANALISTA 1</b>						
<b>No.</b>	<b>[Cu<sup>+2</sup>]</b>	<b>Absorbancia</b>				<b>Desviación Estándar</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>	
0	0,81	2,9	2,91	2,9	2,9	0,005
1	0,41	1,58	1,57	1,58	1,58	0,002
2	0,2	0,82	0,81	0,81	0,81	0,008
3	0,1	0,42	0,43	0,43	0,43	0,003
4	0,05	0,33	0,33	0,33	0,33	0,003
5	0,03	0,13	0,13	0,14	0,13	0,003
6	0,01	0,09	0,09	0,08	0,09	0,004
7	0,01	0,07	0,07	0,06	0,07	0,002
<b>ANALISTA 2</b>						
<b>No.</b>	<b>[Cu<sup>+2</sup>]</b>	<b>Absorbancia</b>				<b>Desviación Estándar</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>	
0	0,81	2,9	2,91	2,89	2,9	0,009
1	0,41	1,57	1,56	1,57	1,57	0,002
2	0,2	0,8	0,79	0,8	0,8	0,006
3	0,1	0,42	0,42	0,42	0,42	0,002
4	0,05	0,23	0,23	0,23	0,23	0,002
5	0,03	0,13	0,13	0,14	0,13	0,003
6	0,01	0,08	0,09	0,09	0,08	0,002
7	0,01	0,06	0,06	0,06	0,06	0,001

**Puntos promedio de la curva de calibración**

No.	[Cu <sup>+2</sup> ]	Analista 1	Analista 2	Promedio	Desviación Estándar
0	0,81	2,90	2,90	2,90	0,004
1	0,41	1,58	1,57	1,57	0,008
2	0,20	0,81	0,80	0,81	0,012
3	0,10	0,43	0,42	0,42	0,005
4	0,05	0,33	0,23	0,28	0,070
5	0,03	0,13	0,13	0,13	0,001
6	0,01	0,09	0,08	0,09	0,002
7	0,01	0,07	0,06	0,06	0,003

**Curva de calibración de la solución de sulfato de cobre pentahidratado**

**[Absorbancia- Concentración molar]**



### Modelo matemático de la curva de calibración

Modelo matemático	R <sup>2</sup>
<b>A=3,5442[CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O]+0,0648</b>	<b>0,9985</b>

- Evaluación de la reacción redox a dos fases entre el cobre [Cu<sup>+2</sup>]= 0,814 M y zinc (Zn<sup>0</sup>) para un tiempo de reacción de 5 minutos

### Concentración de sulfato de cobre pentahidratado en la reacción redox entre el cobre y el zinc

Proporción molar zinc: cobre (Zn: Cu)	Cobre Final (Absorbancia)		Concentración cobre final (M)	
	1	2	1	2
(1:1)	1,799	1,727	0,490	0,470
(2:1)	0,602	0,562	0,152	0,140
(3:1)	0,211	0,24	0,041	0,049
(4:1)	0,261	0,23	0,055	0,046

### Porcentaje de cobre reducido en la reacción redox entre el cobre [Cu<sup>+2</sup>]= 0,814 M y zinc (Zn<sup>0</sup>) para un tiempo de reacción de 5 minutos

Proporción zinc: cobre (Zn: Cu)	Cobre Final (mol)		Cobre inicial (mol)	Cobre reducidos (mol)		% de cobre reducido		Promedio	Desviación estándar		
	1	2		1	2	1	2				
(1:1)	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	39,76	42,26	<b>41,01</b>	<b>1,77</b>		
(2:1)	0,001	0,001		0,003	0,003	81,38	82,77			<b>82,07</b>	<b>0,98</b>
(3:1)	0,000	0,000		0,004	0,004	94,97	93,97			<b>94,47</b>	<b>0,71</b>
(4:1)	0,000	0,000		0,004	0,004	93,24	94,31			<b>93,77</b>	<b>0,76</b>

- Evaluación de la proporción cobre - mercurio para la formación de amalgama en el procedimiento con la reacción redox con una proporción de zinc: cobre (1:1) y para un tiempo de 15 minutos

### Formación de amalgama de cobre

[Cu <sup>2+</sup> ]	Proporción molar cobre – mercurio (Cu:Hg)			
	1:1	2:1	3:1	4:1
0,25 M	-	-	-	-
0,5 M	-	-	-	-
0,75 M	+	+	+	+
1,0 M	+	+	+	+

- Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico mediante un procedimiento de amalgamamiento.

### Determinación de moles de cobre amalgamados en el proceso de inmovilización del mercurio

Analista	Hg <sub>0</sub>	V	F <sub>0</sub>	C <sub>0</sub>	n <sub>Cu<sup>+2</sup><sub>0</sub></sub>	Zn <sub>0</sub>	F <sub>f</sub>	C <sub>f</sub>	n <sub>Cu<sup>+2</sup><sub>f</sub></sub>	n <sub>Cu<sup>0</sup><sub>am</sub></sub>	
# 1	1	299,00	5,50	2,89	0,80	0,004	584,70	0,08	0,005	3,0E-05	0,004
	2	297,00	5,46	2,88	0,80	0,004	580,80	0,07	0,004	2,2E-05	0,004
	3	274,00	5,07	2,89	0,80	0,004	539,70	0,08	0,005	2,4E-05	0,004
<b>,Promedio</b>	<b>290,00</b>	<b>5,34</b>	<b>2,89</b>	<b>0,80</b>	<b>0,004</b>	<b>568,40</b>	<b>0,08</b>	<b>0,005</b>	<b>2,53E-05</b>	<b>0,004</b>	
<b>Desviación</b>	<b>13,89</b>	<b>0,24</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,000</b>	<b>24,93</b>	<b>0,00</b>	<b>0,001</b>	<b>4,02E-06</b>	<b>0,000</b>	
# 2	1	220,00	4,05	2,88	0,79	0,003	430,70	0,07	0,003	1,3E-05	0,003
	2	274,00	4,54	2,88	0,80	0,004	535,80	0,07	0,003	1,2E-05	0,004
	3	234,00	4,30	2,88	0,80	0,003	574,90	0,07	0,004	1,6E-05	0,003
<b>Promedio</b>	<b>242,67</b>	<b>4,30</b>	<b>2,88</b>	<b>0,80</b>	<b>0,003</b>	<b>513,80</b>	<b>0,07</b>	<b>0,003</b>	<b>1,34E-05</b>	<b>0,003</b>	
<b>Desviación</b>	<b>28,02</b>	<b>0,25</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,000</b>	<b>74,57</b>	<b>0,00</b>	<b>0,001</b>	<b>2,21E-06</b>	<b>0,000</b>	
# 3	1	218,00	4,01	2,88	0,79	0,003	426,30	0,08	0,006	2,4E-05	0,003
	2	265,00	4,87	2,88	0,80	0,004	518,20	0,08	0,007	3,2E-05	0,004
	3	226,00	4,16	2,86	0,79	0,003	442,00	0,10	0,011	4,6E-05	0,003
<b>Promedio</b>	<b>236,33</b>	<b>4,35</b>	<b>2,87</b>	<b>0,79</b>	<b>0,003</b>	<b>462,17</b>	<b>0,09</b>	<b>0,008</b>	<b>3,38E-05</b>	<b>0,003</b>	
<b>Desviación</b>	<b>25,15</b>	<b>0,46</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,000</b>	<b>49,16</b>	<b>0,01</b>	<b>0,003</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,000</b>	
<b>PROMEDIO</b>	<b>256,33</b>	<b>4,66</b>	<b>2,88</b>	<b>0,80</b>	<b>0,004</b>	<b>514,79</b>	<b>0,08</b>	<b>0,005</b>	<b>2,4E-05</b>	<b>2,4E-05</b>	
<b>DESVIACIÓN</b>	<b>32,37</b>	<b>0,59</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,000</b>	<b>65,32</b>	<b>0,01</b>	<b>0,003</b>	<b>1,1E-05</b>	<b>1,1E-05</b>	

**Evaluación del proceso de inmovilización del mercurio metálico  
mediante un procedimiento de amalgamamiento**

Analista		Cu <sup>0</sup> <sub>am</sub> (mg)	Desecho AC + Zn <sub>ex</sub> (mg)	AC <sub>exp</sub> (mg)	Zn <sub>ex</sub> (mg)
1	1	277,420	908,00	504,00	404,00
	2	274,717	1020,00	574,00	446,00
	3	255,276	823,00	474,00	349,00
<b>Promedio</b>		<b>269,137</b>	<b>269,137</b>	<b>917,00</b>	<b>517,33</b>
<b>Desviación</b>		<b>12,080</b>	<b>12,080</b>	<b>98,81</b>	<b>51,32</b>
2	1	203,774	690,00	394,00	296,00
	2	228,834	903,00	464,00	439,00
	3	216,583	914,00	425,00	489,00
<b>Promedio</b>		<b>216,397</b>	<b>216,397</b>	<b>835,67</b>	<b>427,67</b>
<b>Desviación</b>		<b>12,532</b>	<b>12,532</b>	<b>126,27</b>	<b>35,08</b>
3	1	200,898	686,00	419,00	267,00
	2	244,071	894,00	483,00	411,00
	3	206,027	796,00	405,00	391,00
<b>Promedio</b>		<b>216,99</b>	<b>216,99</b>	<b>792,00</b>	<b>435,67</b>
<b>Desviación</b>		<b>23,59</b>	<b>23,58</b>	<b>104,06</b>	<b>41,59</b>
<b>PROMEDIO</b>		<b>234,18</b>	<b>277,42</b>	<b>908,00</b>	<b>504,00</b>
<b>DESVIACIÓN</b>		<b>30,04</b>	<b>274,71</b>	<b>1020,00</b>	<b>574,00</b>

**Evaluación de la solución de sulfato de cobre posterior al procedimiento  
de amalgamamiento.**

Especie analizada	Zinc oxidado (mg/L)	Cobre oxidado (mg/L)	Mercurio oxidado (µg)
<b>Promedio</b>	<b>&gt;2,5</b>	<b>0,01</b>	<b>0,64</b>

- Determinación mediante balance de masa de la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento

**Proporción molar de cobre: mercurio experimental en el  
procedimiento de amalgamamiento**

Analista	Moles de cobre (Cu <sup>0</sup> ) amalgamados	Moles de mercurio amalgamados (mol)	Proporción Cu:Hg	% Error relativo	
1	1	0,004	0,0015	2,93	2,36
	2	0,004	0,001	2,92	2,66
	3	0,004	0,001	2,94	1,96
	<b>Promedio</b>	<b>0.004</b>	0,004	0,001	2,93
<b>Desviación</b>	0.000	0,000	0,000	0,01	
2	1	0,003	0,001	2,92	2,53
	2	0,004	0,001	2,64	12,12
	3	0,003	0,001	2,92	2,60
	<b>Promedio</b>	<b>0.003</b>	0,003	0,001	2,83
<b>Desviación</b>	<b>0.000</b>	0,000	0,000	0,17	
3	1	0,003	0,001	2,91	3,02
	2	0,004	0,001	2,91	3,08
	3	0,003	0,001	2,88	4,07
	<b>Promedio</b>	<b>0,003</b>	0,003	0,001	2,90
<b>Desviación</b>	<b>0,000</b>	0,000	0,000	0,02	
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,004</b>	<b>0,001</b>	<b>2,89</b>	<b>3,82</b>	
<b>DESVIACIÓN</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,09</b>	<b>1,75</b>	

- Determinación del porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento

### Porcentaje de mercurio inmovilizado por amalgamamiento

Analista		Masa mercurio inicial (mg)	Mercurio en solución sin amalgamar ( $\mu\text{g}$ )	Mercurio amalgamado (mg)	% Mercurio inmovilizado
1	1	299,00	0,64	299,00	99,99
	2	297,00	0,64	297,00	99,99
	3	274,00	0,64	274,00	99,99
<b>Promedio</b>		<b>290,00</b>	<b>0,64</b>	<b>290,00</b>	<b>99,99</b>
<b>Desviación</b>		<b>13,89</b>	<b>0,00</b>	<b>13,89</b>	<b>0,00</b>
2	1	220,00	0,64	220,00	99,99
	2	274,00	0,64	274,00	99,99
	3	234,00	0,64	234,00	99,99
<b>Promedio</b>		<b>242,67</b>	<b>0,64</b>	<b>242,67</b>	<b>99,99</b>
<b>Desviación</b>		<b>28,02</b>	<b>0,00</b>	<b>28,02</b>	<b>0,00</b>
3	1	218,00	0,64	218,00	99,99
	2	265,00	0,64	265,00	99,99
	3	226,00	0,64	226,00	99,99
<b>Promedio</b>		<b>236,33</b>	<b>0,64</b>	<b>236,33</b>	<b>99,99</b>
<b>Desviación</b>		<b>25,15</b>	<b>0,00</b>	<b>25,15</b>	<b>0,00</b>
<b>PROMEDIO</b>		<b>256,33</b>	<b>0,64</b>	<b>256,33</b>	<b>99,99</b>
<b>DESVIACIÓN</b>		<b>32,37</b>	<b>0,00</b>	<b>32,37</b>	<b>0,00</b>

- Determinación mediante balance de masa la proporción experimental del desecho generado en el procedimiento de amalgamamiento.

**Proporción másica experimental del desecho generado en el  
procedimiento de amalgamamiento**

Analista		Desecho $\text{Cu}_x\text{Hg}_y + \text{Zn}^0$ (mg)	% Masa amalgama de cobre	% Masa de zinc elemental
1	1	908,00	55,51	44,49
	2	1020,00	56,27	43,73
	3	823,00	57,59	42,41
<b>Promedio</b>		<b>269,137</b>	<b>56,46</b>	<b>43,54</b>
<b>Desviación</b>		<b>12,080</b>	<b>1,06</b>	<b>1,06</b>
2	1	690,00	57,10	42,90
	2	903,00	51,38	48,62
	3	914,00	46,50	53,50
<b>Promedio</b>		<b>216,397</b>	<b>51,66</b>	<b>48,34</b>
<b>Desviación</b>		<b>12,532</b>	<b>5,31</b>	<b>5,31</b>
3	1	686,00	61,08	38,92
	2	894,00	54,03	45,97
	3	796,00	50,88	49,12
<b>Promedio</b>		<b>216,99</b>	<b>55,33</b>	<b>44,67</b>
<b>Desviación</b>		<b>23,58</b>	<b>5,22</b>	<b>5,22</b>
<b>PROMEDIO</b>		<b>277,42</b>	<b>54,48</b>	<b>45,52</b>
<b>DESVIACIÓN</b>		<b>274,71</b>	<b>4,34</b>	<b>4,34</b>



## **ANEXOS**



- Resultados por espectrometría de absorción atómica de mercurio remanente en los tubos de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico.

### Tratamiento térmico a 400 grados Celsius.



**INLASA**  
Investigación • Laboratorio • Análisis • Control • Asesorías

INLASA, S.A.  
29 calle 19-11 Zona 12  
Teléfonos: 24761795, 24780337 Fax: 24789349  
E-Mail: servicioalcliente@inlasa.com  
www.inlasa.com

Número:  
**1-2012**  
Hoja 1 de 2

**INFORME DE RESULTADOS**

Cliente: (0333) SENACYT  
Dirección: 3a Ave 13-28 Zona 1, Ciudad de Guatemala

Fecha de ingreso: 15/May/2012  
Hora de ingreso: 15:44  
Orden de Ingreso: 2012001547  
Responsable de muestreo:

Fecha de Emisión: 01/06/2012  
Hora de Emisión: 12:47

---

Muestra: (59929) agua #1  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	89.81 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59930) agua #2  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	43.94 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59931) agua #3  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	70.99 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59932) agua #4  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	322.77 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59933) agua #5  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	166.89 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59934) agua #6  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	53.30 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del Laboratorio.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este Informe sin la autorización del Director Técnico.

Lic. Raúl Parra Piloña  
Químico Biólogo Colegiado 1347  
Director Técnico INLASA, S.A.

Supervisado por: 

Fuente: INLASA, S.A., Guatemala

# Tratamiento térmico a 600 grados Celsius



INLASA, S.A.  
29 calle 19-11 Zona 12  
Teléfono: 24761795, 24760337 Fax: 24769349  
E-Mail: servicios@clientes@inlasa.com  
www.inlasa.com

## INFORME DE RESULTADOS

Número:  
**1-2012**  
Hoja 2 de 2

Cliente: (0333) SENACYT  
Dirección: 3a Ave 13-28 Zona 1, Ciudad de Guatemala  
Fecha de Ingreso: 16/May/2012  
Hora de Ingreso: 15:44  
Orden de Ingreso: 2012001547  
Responsable de muestreo:

Fecha de Emisión: 01/06/2012  
Hora de Emisión: 12:47

Muestra: (59935) agua #7  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	449.01 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59936) agua #8  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	34.46 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59937) agua #9  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	383.95 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59938) agua #10  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	ND mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59939) agua #11  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	ND mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Muestra: (59940) agua #12  
Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	ND mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	01/06/2012

Observaciones:

Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del Laboratorio.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de éste informe sin la autorización del Director Técnico.

Lic. Raúl Pineda Piloña  
Químico Biólogo Colegiado 1347  
Director Técnico INLASA, S.A.

Supervisado por:

Fuente: INLASA, S.A., Guatemala

# Tratamiento térmico a 800 grados Celsius y 30 minutos



INLASA, S.A.  
29 calle 19-11 Zona 12  
Teléfonos: 24761795, 24760337 Fax: 24769349  
E-Mail: servicioalcliente@inlasa.com  
www.inlasa.com

## INFORME DE RESULTADOS

Número:  
**2-2012**  
Hoja 1 de 1

Cliente: (0333) SENACYT (PROYECTO 19-2010)  
Dirección: 3a Ave 13-28 Zona 1, Ciudad de Guatemala  
Fecha de ingreso: 09/Jul/2012  
Hora de ingreso: 11:04  
Orden de Ingreso: 2012002259  
Responsable de muestreo: Cliente

Fecha de Emisión: 23/07/2012  
Hora de Emisión: 13:07

Muestra: (61408) muestra uno  
Descripción: 30 minutos 800°C

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	37.04 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FO-022	23/07/2012

Observaciones:

Ultima Linea \*\*

Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del Laboratorio.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización del Director Técnico.

Lic. Raúl Paniagua P.  
Químico Biólogo, Céd. No. 1347  
Director Técnico INLASA, S.A.

Supervisado por:

Fuente: INLASA, S.A., Guatemala

## Tratamiento térmico 800 grados Celsius y 60 minutos



INLASA, S.A.  
29 calle 19-11 Zona 12  
Teléfonos: 24761795, 24760337 Fax: 24769349  
E-Mail: servicioalcliente@inlasa.com  
www.inlasa.com

### INFORME DE RESULTADOS

Número:  
**3-2012**  
Hoja 1 de 1

Cliente: (0333) SENACYT (PROYECTO 19-2010)  
Dirección: 3a Ave 13-28 Zona 1, Ciudad de Guatemala

Fecha de Emisión: 23/07/2012  
Hora de Emisión: 13:08

Fecha de Ingreso: 09/Jul/2012

Hora de Ingreso: 11:08

Orden de Ingreso: 2012002260

Responsable de muestras: Cliente

Muestra: (61409) muestra dos  
Descripción: 60 minutos 800 °c

ANÁLISIS	RESULTADO	LÍMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGÍA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	137.27 mg/L	1 mg/L	Método AA PC-FD-022	23/07/2012

Observaciones:

Ultima Línea \*\*

Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del Laboratorio.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de éste informe sin la autorización del Director Técnico.

Lic. Raúl Panagariño  
Químico Biólogo, Colegiado 1347  
Director Técnico INLASA, S.A.

Supervisado por:

Fuente: INLASA, S.A., Guatemala

# Tratamiento térmico a 800 grados Celsius y 90 minutos



INLASA, S.A.  
29 calle 19-11 Zona 12  
Teléfonos: 24761795, 24760337 Fax: 24769349  
E-Mail: servicioalcliente@inlase.com  
www.inlase.com

## INFORME DE RESULTADOS

Número:  
**4-2012**  
Hoja 1 de 1

Cliente: (0333) SENACYT (PROYECTO 19-2010)  
Dirección: 3a Ave 13-28 Zona 1, Ciudad de Guatemala  
Fecha de ingreso: 09/Jul/2012  
Hora de ingreso: 11:10  
Orden de Ingreso: 2012002261  
Responsable de muestreo: Cliente

Fecha de Emisión: 23/07/2012  
Hora de Emisión: 13:09

Muestra: (S1410) muestra tres  
Descripción: 90 minutos, 800 °c

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	62.14 mg/L	1 mg/L	Metales AA PC-FQ-022	23/07/2012

Observaciones:

Última Línea \*\*

Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del Laboratorio.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización del Director Técnico.

Lic. Raúl Fernández Piñola  
Químico Biólogo, Colegiado 1347  
Director Técnico INLASA, S.A.

Supervisado por:

Fuente: INLASA, S.A., Guatemala

- Resultados por espectrometría de fluorescencia de rayos X de la detección de plomo y tungsteno remanente en los tubos de descarga (ampolla de cuarzo) posterior al tratamiento térmico.


**Fisichem Inc.**  
 Blvd. Los Próceres 24-69 Z. 10 Zona Pradera, Torre 2, Oficina 1801 Guatemala 01010 Tels: 502 50330311 Fax: 502 2043-0271  
 1031 Ives Dairy Road, Suite 222, Miami, Florida 33179 E-mail: fisichem@fisichem.com

**Informe de Análisis Casta113**

**A. Información del cliente**

Empresa	Dra. Carla Zeceña	Contacto: <i>Héctor Méndez</i>	
Persona solicitante:		Correo electrónico:	<i>hector.mendezrossal@gmail.com</i>
Dirección:	Ciudad Universitaria	Teléfonos y fax: 5918-1879	Fecha: 21 de febrero de 2013

**B. Descripción de las muestras a analizar:** *1 muestra líquida en solución ácida.*

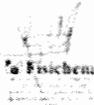
**C. Resultados del análisis cualitativo**

<b>Elementos Presentes en Muestra</b>
<i>Mercurio, Hg</i>

**D. Otros detalles del análisis realizado:** La muestra original se midió en forma directa.

**E. Observaciones:** No se detectó presencia de Plomo (Pb), ni de Wolframio (W).

  
 www.fisichem.com  
 E-mail: fisichem@fisichem.com

  
**Analista:** Lic. Rony E. Ayala J.  
 Fisichem Inc.

cc: Archivo

Fuente: Fisichem Inc.

- Resultados por espectrometría de absorción atómica de la cuantificación de mercurio en la solución final del procedimiento de amalgamamiento.

## Solución final del procedimiento de amalgamamiento 1



INLASA, S.A.  
29 calle 19-11 Zona 12  
Teléfonos: 24761795, 24760337 Fax: 24769349  
E-Mail: servicioalcliente@inlasa.com  
www.inlasa.com

### INFORME DE RESULTADOS

Número:  
**5-2012**  
Hoja 1 de 1

Cliente: {0333} SENACYT  
Dirección: 3a Ave 13-28 Zona 1, Ciudad de Guatemala

Fecha de Emisión: 07/12/2012  
Hora de Emisión: 14:01

Fecha de Ingreso: 23/Nov/2012  
Hora de Ingreso: 12:45  
Orden de Ingreso: 2012004888

Responsable de muestreo:

Muestra: (65018) solución #1

Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LÍMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGÍA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	2.88 µg/L	0.5 µg/L	Mercurio PC-FG-018	07/12/2012

Observaciones:

Última Línea \*\*

Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del Laboratorio. Se prohíbe la reproducción total o parcial de éste informe sin la autorización del Director Técnico.

Lic. Raúl Pineda Piloña  
Químico Biólogo Colegiado 1347  
Director Técnico INLASA, S.A.

Supervisado por:



ACREDITADO  
OGA LE-008-05

Fuente: INLASA, S.A., Guatemala

## Solución final del procedimiento de amalgamamiento 2



INLASA, S.A.  
29 calle 19-11 Zona 12  
Teléfonos: 24761795, 24760337 Fax: 24769349  
E-Mail: servicioalcliente@inlase.com  
www.inlase.com

### INFORME DE RESULTADOS

Número:  
**6-2012**  
Hoja 1 de 1

Cliente: (0333) SENACYT  
Dirección: 3a Ave 13-28 Zona 1, Ciudad de Guatemala  
Fecha de ingreso: 23/Nov/2012  
Hora de ingreso: 12:47  
Orden de Ingreso: 2012004889  
Responsable de muestreo:

Fecha de Emisión: 07/12/2012  
Hora de Emisión: 14:28

Muestra: (66017) solución #2

Descripción:

ANÁLISIS	RESULTADO	LIMITE DE DETECCIÓN	METODOLOGIA	FECHA DE ANÁLISIS
Mercurio	35.88 µg/L	0.5 µg/L	Mercurio PQ-FQ-018	07/12/2012

Observaciones:

Última Línea \*\*

Estos resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas por el personal del Laboratorio.  
Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización del Director Técnico.

Lic. Raul Pineda Piloña  
Químico Biólogo Colegiado 1347  
Director Técnico INLASA, S.A.

Supervisado por:



ACREDITADO  
OGA LE 008-05

Fuente: INLASA, S.A., Guatemala

- Procedimiento de apertura de tubos de descarga (ampollas de cuarzo)
  1. Asegurar el molde a la superficie en la cual se trabajará.
  2. Colocar la ampolla dentro del molde de tal manera que encaje en el espacio correspondiente, y dejar el lado que solo posee un electrodo principal en la parte que estará expuesta a cortadura.
  3. Colocar las tapas del molde sobre la ampolla.
  4. Rayar con el cortador de vidrio exactamente en el sello de la ampolla.
  5. Cuando se ha rayado lo suficiente se golpea suavemente con el cortador de vidrio la parte del sello de la ampolla.
  6. Retirar las tapas del molde para poder manipular la ampolla.
  7. Separar el electrodo del resto de la ampolla de cuarzo, moviendo suavemente a los lados procurando evitar quebrar la ampolla.
  8. Al separar la unión del sello de la ampolla queda exactamente un orificio por donde sale el electrodo. Colocar en una bolsa previamente rotulada la parte de la ampolla que contiene el electrodo.

9. Obtener el mercurio dejándolo pasar por el orificio. Recuperándolo en un tubo de ensayo, el cual ha sido previamente tarado.

*Mercurio obtenido por el método de la columna de mercurio.*

Se pesa el mercurio en un tubo de ensayo tarado y se coloca en un matraz de Erlenmeyer de 250 ml. Se agregan 10 ml de  $HNO_3$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $HNO_3$ . Se agregan 10 ml de  $HCl$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $HCl$ .

*Mercurio obtenido por el método de la columna de mercurio.*

Se pesa el mercurio en un tubo de ensayo tarado y se coloca en un matraz de Erlenmeyer de 250 ml. Se agregan 10 ml de  $HNO_3$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $HNO_3$ .

Se agregan 10 ml de  $HCl$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $HCl$ . Se agregan 10 ml de  $H_2O$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $H_2O$ .

*Mercurio obtenido por el método de la columna de mercurio.*

Se pesa el mercurio en un tubo de ensayo tarado y se coloca en un matraz de Erlenmeyer de 250 ml. Se agregan 10 ml de  $HNO_3$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $HNO_3$ .

Se agregan 10 ml de  $HCl$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $HCl$ . Se agregan 10 ml de  $H_2O$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $H_2O$ .

Se agregan 10 ml de  $H_2O$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $H_2O$ . Se agregan 10 ml de  $H_2O$  y se calienta a baño maría para que se evapore el exceso de  $H_2O$ .

- Tablas de potenciales de reducción.

TABLE 19.1 Standard Reduction Potentials at 25°C\*

Half-Reaction	$E^\circ(\text{V})$
$\text{F}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{F}^-(\text{aq})$	+2.87
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+2.07
$\text{Co}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Co}^{2+}(\text{aq})$	+1.82
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+1.77
$\text{PbO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+1.70
$\text{Ce}^{4+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ce}^{3+}(\text{aq})$	+1.61
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 5\text{e}^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+1.51
$\text{Au}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Au}(\text{s})$	+1.50
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cl}^-(\text{aq})$	+1.36
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14\text{H}^+(\text{aq}) + 6\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+1.33
$\text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+1.23
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+1.23
$\text{Br}_2(\text{l}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Br}^-(\text{aq})$	+1.07
$\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{NO}(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+0.96
$2\text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Hg}_2^{2+}(\text{aq})$	+0.92
$\text{Hg}_2^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Hg}(\text{l})$	+0.85
$\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}(\text{s})$	+0.80
$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	+0.77
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$	+0.68
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{MnO}_2(\text{s}) + 4\text{OH}^-(\text{aq})$	+0.59
$\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{I}^-(\text{aq})$	+0.53
$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-(\text{aq})$	+0.40
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}(\text{s})$	+0.34
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}(\text{s}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$	+0.22
$\text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{SO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	+0.20
$\text{Cu}^{+}(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}(\text{s})$	+0.15
$\text{Sn}^{4+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Sn}^{2+}(\text{aq})$	+0.13
$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0.00
$\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb}(\text{s})$	-0.13
$\text{Sn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Sn}(\text{s})$	-0.14
$\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ni}(\text{s})$	-0.25
$\text{Co}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Co}(\text{s})$	-0.28
$\text{PbSO}_4(\text{s}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb}(\text{s}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$	-0.31
$\text{Cd}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cd}(\text{s})$	-0.40
$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0.44
$\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Cr}(\text{s})$	-0.74
$\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Zn}(\text{s})$	-0.76
$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	-0.83
$\text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Mn}(\text{s})$	-1.18
$\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \longrightarrow \text{Al}(\text{s})$	-1.66
$\text{Be}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Be}(\text{s})$	-1.85
$\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Mg}(\text{s})$	-2.37
$\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Na}(\text{s})$	-2.71
$\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ca}(\text{s})$	-2.87
$\text{Sr}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Sr}(\text{s})$	-2.89
$\text{Ba}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ba}(\text{s})$	-2.90
$\text{K}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{K}(\text{s})$	-2.93
$\text{Li}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \longrightarrow \text{Li}(\text{s})$	-3.05

Increasing strength as oxidizing agent

Increasing strength as reducing agent

Fuente: CHANG, Raymond. Química. p. 846.

## 2019年12月31日

2019年12月31日