



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

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO HIDROMETALÚRGICO DE  
RECUPERACIÓN DE ZINC A PARTIR DE LOS DESPERDICIOS DE PILAS ALCALINAS A  
NIVEL LABORATORIO**

**Herbert Fernando Castro Abal**

Asesorado por el Ing. Qco. William Eduardo Fagiani Cruz

Guatemala, Agosto de 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO HIDROMETALÚRGICO DE  
RECUPERACIÓN DE ZINC A PARTIR DE LOS DESPERDICIOS DE PILAS ALCALINAS A  
NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HERBERT FERNANDO CASTRO ABAL**

ASESORADO POR EL ING. QCO. WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López



## 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 Y OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO HIDROMETALÚRGICO DE  
RECUPERACIÓN DE ZINC A PARTIR DE LOS DESPERDICIOS DE PILAS ALCALINAS A  
NIVEL LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 12 de junio de 2015.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Herbert', enclosed within a large, hand-drawn oval shape.

**Herbert Fernando Castro Abal**

Guatemala, 20 de Febrero de 2017

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director de la Escuela de Ingeniería Química  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Estimado Ing. Wong

Por este medio reciba un cordial saludo, deseándole éxitos en sus actividades cotidianas. Me dispongo a informar que he revisado y aprobado el Informe Final de Trabajo de Graduación, con título: "Evaluación y optimización de el método hidrometalúrgico de recuperación de zinc a partir de los desperdicios de pilas alcalinas a nivel laboratorio". El cual es realizado por el estudiante Herbert Fernando Castro Abal, que se identifica con carné 201020268 y CUI No. 2131 79938 0101 y se encuentra en la carrera de Ingeniería Química.

Atte.



**INGENIERO QUÍMICO**  
**WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ**  
COL. 1734

Ing. Qco. William Eduardo Fagiani Cruz



Guatemala, 10 de marzo de 2017.  
Ref. EIQ.TG-IF.009.2017.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **030-2015** 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: **Herbert Fernando Castro Abal**.  
Identificado con número de carné: **2010-20268**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

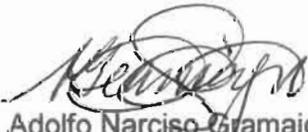
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE EL MÉTODO HIDROMETALÚRGICO DE RECUPERACIÓN DE ZINC A PARTIR DE LOS DESPERDICIOS DE PILAS ALCALINAS A NIVEL LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **William Eduardo Fagiani Cruz**.

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. Adolfo Narciso Gramajo Antonio  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.037.2017

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, **HERBERT FERNANDO CASTRO ABAL** titulado: **"EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO HIDROMETALÚRGICO DE RECUPERACIÓN DE ZINC A PARTIR DE LOS DESPERDICIOS DE PILAS ALCALINAS A NIVEL LABORATORIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*



Ing. Carlos Salvador Wong Dav  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, julio 2017

Cc: Archivo  
CSWD/ale

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.344-2017

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: **ÉVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO HIDROMETALÚRGICO DE RECUPERACIÓN DE ZINC A PARTIR DE LOS DESPERDICIOS DE PILAS ALCALINAS A NIVEL LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Herbert Fernando Castro Abal**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Blanco  
Decano



Guatemala, agosto de 2017

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por cuidar de mí en todo momento, por guiar mis pasos, brindarme sabiduría; por darme fuerza para alcanzar mis metas entre otras cosas.
- Mis padres** Erick Rodolfo Castro Martínez y Ana Judith Abal Guerra; por estar a mi lado en todo momento; por su amor, apoyo, educación y sacrificio todos estos años; por ser mi inspiración y ejemplo a seguir.
- Mi hermana** Velveth Fabiola Castro Abal, por ser una persona muy importante en mi vida; por su amor, sacrificio; por ser mi inspiración y motivo para seguir superándome en la vida.
- Mis primos** Por su apoyo y cariño; por estar a mi lado siempre. Especialmente a Karen Eugenia Castillo Abal, por guiarme e inspirarme a ser una mejor persona.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme realizar mi formación profesional, brindarme una educación integral y oportunidades de crecimiento personal y social.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por las oportunidades de desarrollo brindadas hacia mi persona. Especialmente en la Escuela de Ingeniería Química.
<b>Mis amigos de la facultad</b>	Anasheila Pérez, Eliana Carranza, Dayanne Zelada, Janiel Coyoy, Mynor Pérez, Oscar Alvarado, Sucely Zapeta. Gracias por su amistad y confianza, por el apoyo y todas las experiencias compartidas.
<b>Mis amigos de la infancia</b>	Kevin Rodríguez, Mario Castillo, Enrique Hernández, Jose Laparra, Marco Urrutia, Oscar Morán. Por ser una importante influencia en mi vida, por su amistad y confianza, por el apoyo y todas las experiencias compartidas. Gracias por su amistad que superará fronteras y tiempo.
<b>Iris Angélica Marchorro Chacón</b>	Por su ayuda y asistencia dentro del desarrollo de la fase experimental de mi trabajo de graduación y por ser una excelente amiga.

**Ing. Qco. William  
Eduardo Fagiani Cruz**

Por su apoyo, amistad y aprecio; por su asistencia como asesor del trabajo de graduación, amabilidad y disponibilidad; por ayudarme en mi formación como profesional; por compartir su experiencia y conocimiento.

**M.Sc. Félix Ricardo Véliz  
Fuentes**

Por su asistencia como coasesor del trabajo de graduación; por su amistad, apoyo, confianza, amabilidad y disponibilidad; por compartir su experiencia y conocimiento; por su apoyo en mi formación como investigador y profesional.

**Licda. Bessie Evelyn  
Oliva Hernández**

Por su asistencia como coasesora del trabajo de graduación; por su amistad, disponibilidad y paciencia; por compartir su experiencia y conocimiento; por confiar en mí e incitarme a alcanzar el éxito.

**Departamento de  
Análisis Inorgánico,  
Facultad de Ciencias  
Químicas y Farmacia**

M.A. Pablo Oliva, Licda. Marta Del Cid, Ilse Archila, Vilma Gomez, Licda. Patricia Navas, por su apoyo, amistad y brindarme la oportunidad de desarrollar la investigación en sus instalaciones.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Características generales de los acumuladores eléctricos.....	3
2.2. Clasificación de las baterías .....	5
2.2.1. Pilas primarias .....	5
2.2.2. Pilas secundarias.....	5
2.2.2.1. Dispositivo de almacenamiento .....	6
2.2.2.2. Dispositivo de pila primaria .....	6
2.3. Composición de las pilas alcalinas .....	8
2.3.1. Reacciones de la pila alcalina.....	9
2.3.2. Tamaños y diseños de las pilas.....	10
2.3.2.1. Redondas o cilíndricas .....	10
2.4. Pirometalurgia .....	11
2.5. Hidrometalurgia .....	12
2.5.1. Aplicación de la hidrometalurgia.....	12

2.5.2.	Especificaciones del método de la hidrometalurgia.....	15
2.5.2.1.	Lixiviación.....	15
2.5.2.2.	Estructura de los minerales .....	15
2.6.	Análisis gravimétrico o gravimetría.....	16
2.6.1.	Electroanálisis .....	16
2.7.	Espectrometría de absorción atómica .....	18
2.7.1.	Atomización con llama .....	19
2.7.2.	Instrumentación para absorción atómica.....	20
3.	METODOLOGÍA .....	23
3.1.	Variables .....	23
3.1.1.	Variables independientes .....	23
3.1.2.	Variables dependientes .....	24
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	24
3.3.	Recurso humano disponible.....	25
3.4.	Recurso material disponible.....	25
3.4.1.	Equipos .....	25
3.4.2.	Materiales.....	26
3.4.3.	Reactivos.....	27
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	27
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	27
3.6.1.	Ubicación de la recolección.....	27
3.6.2.	Proceso de recolección .....	28
3.6.2.1.	Desmantelamiento de la pila .....	28
3.6.2.2.	Proceso de lixiviación .....	33
3.6.2.3.	Proceso de electrodeposición del zinc.....	37

3.6.3.	Proceso de análisis por espectrofotometría de absorción atómica.....	39
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	43
3.8.	Plan de análisis de resultados .....	45
3.8.1.	Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables .....	45
3.8.2.	Programas a utilizar para el análisis de datos .....	45
3.9.	Análisis estadístico .....	46
3.9.1.	Error de incertidumbre .....	46
3.9.2.	Error de precisión .....	46
3.9.3.	Análisis de varianza.....	47
4.	RESULTADOS.....	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	53
	CONCLUSIONES .....	57
	RECOMENDACIONES.....	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	61
	APÉNDICES .....	63
	ANEXOS.....	91



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Operación electroquímica de una celda .....	4
2.	Esquema de una pila alcalina .....	8
3.	Pilas cilíndricas .....	10
4.	Proceso físico-químico de la hidrometalurgia.....	13
5.	Esquema de una celda de electroanálisis .....	17
6.	Proceso de atomización .....	19
7.	Espectrofotómetros de llama de haz sencillo y doble.....	21
8.	Desmantelamiento de la pila .....	28
9.	Extracción de ánodo.....	29
10.	Secado de cápsulas .....	29
11.	Pesado de cápsulas .....	30
12.	Secado de ánodo .....	30
13.	Peso final de cápsula y ánodo .....	31
14.	Reducción del tamaño de la partícula .....	32
15.	Almacenamiento .....	32
16.	Medición de peso de vasos.....	33
17.	Preparación de la digestión con ácido nítrico.....	34
18.	Digestión de la muestra de ánodo.....	34
19.	Pesado de papel filtro.....	35
20.	Filtrado y almacenamiento de solución .....	36
21.	Pesado de papel filtro, final .....	36
22.	Celda electroquímica.....	37
23.	Láminas de acero y aluminio.....	38

24.	Proceso de limpieza y decapado .....	38
25.	Curva de calibración Zn (AAS) .....	40
26.	Espectrofotómetro de absorción atómica.....	41
27.	Curva de calibración Zn por AAS.....	42
28.	Zinc obtenido a T= 25 °C .....	49
29.	Zinc obtenido a T= 40 °C .....	49
30.	Zinc obtenido a T= 85 °C .....	50

## TABLAS

I.	Clasificación y características de las pilas .....	6
II.	Comparación entre la hidrometalurgia y pirometalurgia.....	14
III.	Variables independientes.....	23
IV.	Variables dependientes .....	24
V.	Equipo.....	25
VI.	Cristalería y accesorios.....	26
VII.	Reactivos .....	27
VIII.	Datos a utilizar en la electrodeposición.....	43
IX.	Tabulación de datos 1.....	43
X.	Tabulación de datos 2.....	43
XI.	Tabulación de datos 3.....	44
XII.	Ordenamiento de datos .....	44
XIII.	Procesamiento de resultados .....	44
XIV.	Estadístico de Fischer, análisis (ANOVA).....	50
XV.	Relación costo beneficio Zn.....	50
XVI.	Desviación estándar y coeficiente de variación .....	51

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\text{HNO}_3$	Ácido nítrico
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Ácido sulfúrico
<b>a</b>	Agitación (rpm)
<b>A</b>	Área ( $m^2$ )
<b>A<sub>p</sub></b>	Área placa ( $m^2$ )
<b>mol</b>	Cantidad de sustancia
<b>cm</b>	Centímetros
$\sigma^2$	Coeficiente de variación estadístico
<b>CV</b>	Coeficiente de variación de precisión
<b>C<sub>i</sub></b>	Concentración compuesto i (mol/L)
<b>C<sub>b</sub></b>	Concentración ácido bórico (mol/L)
<b>C<sub>z</sub></b>	Concentración zinc (mg/L)
<b>c</b>	Corrida
$\sigma$	Desviación estándar
<b>AAS</b>	Espectroscopía de absorción atómica
<b>F</b>	Estadístico de prueba
$^{\circ}\text{C}$	Grado centígrado
<b>gl</b>	Grados de libertad
<b>g</b>	Gramos
<b>H<sub>A1</sub></b>	Hipótesis alternativa en función de la temperatura
<b>H<sub>B1</sub></b>	Hipótesis alternativa en función de la concentración
<b>H<sub>AB1</sub></b>	Hipótesis alternativa en función de la temperatura y concentración

$H_{A0}$	Hipótesis nula en función de la temperatura
$H_{B0}$	Hipótesis nula en función de la concentración
$H_{AB0}$	Hipótesis nula en función de temperatura y concentración
<b>h</b>	Horas
$\Delta I$	Incerteza
<b>Extran® MA 01</b>	Jabón líquido alcalino grado farmacéutico para cristalería
<b>K</b>	Kelvin
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>L</b>	Litros
$M_a$	Marca batería
<b>m</b>	Masa (g)
$m_{al}$	Masa aluminio (g)
$\bar{m}_{al}$	Masa aluminio promedio (g)
$m_{ao}$	Masa ánodo inicial (g)
$m_{af}$	Masa ánodo final (g)
$m_{am}$	Masa ánodo material (g)
$m_b$	Masa batería (g)
$m_{cco}$	Masa cápsula inicial (g)
$m_{ccf}$	Masa cápsula final (g)
$m_{co}$	Masa cátodo inicial (g)
$m_{cf}$	Masa cátodo final (g)
$m_{po}$	Masa papel filtro inicial (g)
$m_{pf}$	Masa papel filtro final (g)
$m_{zn}$	Masa zinc (g)
$\bar{m}_{zn}$	Masa zinc promedio (g)
$m_{znT}$	Masa zinc total ( $g/m^2$ )

$\bar{x}_i$	Media muestral de la variable "xi"
<b>m</b>	Metros
<b>mg</b>	Miligramo
<b>ml</b>	Mililitros
<b>min</b>	Minutos
<b>M</b>	Molar (mol/L)
$\alpha$	Nivel de significancia deseado
<b>N</b>	Número de datos
<b>I</b>	Número de factores de análisis ( $mg/L$ )
<b>J</b>	Número de observaciones
<b>Z<sub>n</sub>SO<sub>4</sub></b>	Sulfato de zinc
<b>T</b>	Temperatura (°C)
<b>t</b>	Tiempo
<b>f</b>	Valor crítico de F
<b>v</b>	Voltaje (v)
<b>V</b>	Volumen (ml)
<b>Z<sub>n</sub></b>	Zinc



## GLOSARIO

<b>Análisis gravimétrico</b>	Método que consiste en separar y pesar, en el estado de mayor pureza, un elemento o compuesto de composición definida con la sustancia que se determina.
<b>Análisis de varianza</b>	Prueba estadística que determina si las medias de dos o más poblaciones son iguales.
<b>Ánodo</b>	Electrodo donde se observa la oxidación.
<b>Cátodo</b>	Electrodo que gana electrones, por tanto, se reduce.
<b>Celda electroquímica</b>	Unidad básica electroquímica que proporciona una fuente de energía mediante una conversión directa de energía química.
<b>Corriente eléctrica</b>	Flujo de cargas o electrones por unidad de tiempo que recorren un circuito cerrado.
<b>Cuantitativo</b>	Referente a parámetros medibles del fenómeno que lo caracterizan como tal.
<b>Curva de calibración</b>	Curva de referencia construida con cantidades conocidas de una sustancia que se utiliza para

determinar la cantidad de esta sustancia presente en una muestra aleatoria.

**Desviación estándar** Medida de dispersión de observaciones respecto a la media de una distribución.

**Electroanálisis** Método para depositar un elemento o compuesto sobre un electrodo.

**Electrodos** Conductor eléctrico utilizado como superficie de contacto para realizar reacciones de óxido-reducción.

**Electrolito** Es un conductor iónico que provee el medio para la transferencia de carga como iones dentro de la celda entre el ánodo y el cátodo.

**Energía eléctrica** Movimiento de cargas eléctricas a través de un conductor.

**Espectrometría (AAS)** Método óptico utilizado para la determinación de diferentes elementos.

**Hidrometalurgia** Extracción mediante métodos físico-químicos cuando estos se desarrollan en medio acuoso.

**Histograma** Gráfico de representación de la distribución de frecuencias de una población.

<b>Incerteza absoluta</b>	Valor que denota el radio en el que se puede encontrar una medición a partir del valor medido.
<b>Lixiviación</b>	Extracción o remoción de un componente soluble contenido en un sólido por medio de un solvente adecuado.
<b>Método instrumental</b>	Serie de pasos de interacciones materia-energía en los que no sucede reacción química necesariamente.
<b>Oxidación</b>	Proceso en el que un compuesto pierde electrones, aumentando su número de oxidación.
<b>Óxido-reducción</b>	Reacción química que involucra un intercambio de electrones provocando un cambio de estados de oxidación.
<b>Pirometalurgia</b>	Método para la obtención y refinación de metales utilizando calor.
<b>Precisión</b>	Ajuste completo o confiabilidad de una medida o dato.
<b>Probabilidad</b>	Posibilidad mayor o menor de la ocurrencia de un suceso.
<b>Reacción química</b>	Proceso por el cual una o más sustancias se transforman en otras llamadas productos.

<b>Reducción</b>	Proceso en el que un compuesto gana electrones, reduciendo su número de oxidación.
<b>Repetibilidad</b>	Variabilidad que un método analítico puede presentar en un periodo corto cuando se realiza a las mismas condiciones.
<b>Voltaje</b>	Potencial eléctrico expresado en voltios.

## RESUMEN

El presente informe detalla los resultados del proceso experimental de evaluación y optimización de una metodología experimental funcional para la recuperación de zinc metálico de las pilas alcalinas desechadas implementando un método hidrometalúrgico, variando los parámetros de temperatura, concentración del electrolito y tiempo.

El procedimiento experimental global desarrollado para la recuperación de zinc comprende dos partes: la primera consiste en la extracción del zinc del ánodo de la pila; la segunda, en un proceso de electroanálisis para la recuperación del zinc metálico. El proceso inició removiendo la parte del ánodo de la pila alcalina donde se encuentra la pasta con zinc, se secó y se redujo el tamaño de la partícula para facilitar el proceso de extracción. Se realizó la recuperación del zinc por medio de lixiviación con ácido nítrico; se digiere la muestra por una hora a 90 °C hasta que se evapora el ácido nítrico en su totalidad; posteriormente, se filtró la muestra para eliminar contaminantes indeseables y se reconstituyó con ácido bórico a diferentes concentraciones como electrolito para el análisis.

Se determinó la concentración de zinc presente en las muestras por medio de espectrofotometría de absorción atómica obteniendo valores en un rango de 2 000,00 a 6 000,00 mg/L; finalmente se recuperó el zinc metálico por gravimetría de electroanálisis utilizando una celda electroquímica. Se graficó el comportamiento de la masa de zinc recuperada por área de placa utilizada (electroanálisis) en función del tiempo a diferentes condiciones de temperatura 25 °C, 40 °C y 85 °C y concentración de electrolito 0,1 M, 0,5 M y 0,9 M.

El factor de agitación para el análisis del sistema se mantuvo constante a 220 rpm para todas las muestras, se observó que la mayor cantidad de zinc se obtiene en las condiciones de 0,9 M y 90 min a una temperatura de 40 °C, siendo el valor  $228,7500 \pm 0,0614 \text{ g/m}^2$  respectivamente. Se obtuvo un porcentaje de recuperación de 22,89 % respecto al valor que se encuentra disponible el zinc en polvo en el mercado.

Finalmente, la desviación de los datos muestra errores mayores al 10 %, lo cual indica que la media o promedio no es valor representativo de los datos por lo que se debe mejorar el control de las condiciones del sistema para minimizar la aleatoriedad. El análisis de varianza ANOVA confirma que no existe un efecto significativo en la cantidad de zinc recuperado debido a la interacción de los parámetros de temperatura y concentración a las condiciones del estudio.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar y optimizar el método hidrometalúrgico para la recuperación de zinc a partir de los desperdicios de pilas alcalinas a nivel de laboratorio determinando condiciones óptimas y relación costo beneficio en un intervalo de temperatura 10 °C - 90 °C y concentraciones 0.1 M, 0,5 M y 0,9 M.

### **Específicos**

1. Determinar el efecto en la cantidad de zinc recuperado al variar la concentración en un intervalo de 0,1 M - 1,0 M y un intervalo de temperatura de 10 °C - 90 °C.
2. Determinar la concentración de solución y temperatura al que se recupera la máxima cantidad de zinc a las condiciones trabajadas.
3. Determinar la relación costo beneficio utilizando datos del mercado actual de zinc.

## Hipótesis

El método hidrometalúrgico es significativamente viable para la recuperación de zinc a partir de desechos de pilas alcalinas en sus condiciones óptimas.

### Hipótesis nula

- $H_{A0}$  = no existe un efecto significativo en la cantidad de zinc recuperado al variar la temperatura en un rango de 10 °C – 90 °C.
- $H_{B0}$  = no existe un efecto significativo en la cantidad de zinc recuperado al variar la concentración del electrolito en un rango de 0,1 M - 0,9 M.
- $H_{AB0}$  = no existe un efecto significativo en la cantidad de zinc recuperado al variar la temperatura en un rango de 10 °C – 90 °C y la concentración de electrolito en un rango de 0,1 M - 0,9 M.

### Hipótesis alternativa

- $H_{A1}$  = existe diferencia significativa en la cantidad de zinc recuperado al variar la temperatura en un rango de 10 °C – 90 °C.
- $H_{B1}$  = existe diferencia significativa en la cantidad de zinc recuperado al variar la concentración del electrolito en un rango de 0,1 M - 0,9 M.
- $H_{AB1}$  = existe diferencia significativa en la cantidad de zinc recuperado al variar la temperatura en un rango de 10 °C – 90 °C y la concentración de electrolito en un rango de 0,1 M - 0,9 M.

## INTRODUCCIÓN

En Guatemala no existe ningún sistema para que los usuarios puedan depositar sus baterías para que sean desechadas adecuadamente para limitar su poder contaminante; por lo tanto, miles terminan mezcladas con el resto de basura, quemadas, o en el fondo de ríos y lagos; los usuarios no tienen alternativa para desecharlas en lugares adecuados pese a ser material peligroso. La mayor proporción de materiales contenidos en las pilas son solubles en los lixiviados que se producen en los rellenos sanitarios que dan lugar a la contaminación de los acuíferos superficiales y subterráneos.

Una pila o batería está formada por diversos materiales que una vez terminada su acción pueden ser útiles para otros fines; se pueden recuperar estas sustancias y reutilizarlas o ser importadas y vendidas a laboratorios químicos como reactivos o industrias para sus procesos. Existe la necesidad de desarrollar métodos de recuperación y valoración de los materiales considerados como residuos que pueden convertirse en productos aptos para la reintegración a los procesos productivos.

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar una propuesta para la recuperación de metales, específicamente zinc, a partir de pilas alcalinas mediante métodos en su mayoría basados en procesos fisicoquímicos, cuantitativos y cualitativos por medio de un proceso hidrometalúrgico que implementará soluciones acuosas y un posterior proceso de electroanálisis para la obtención del metal de interés a nivel laboratorio.

Los procesos de obtención del zinc proveniente de las pilas o baterías por hidrometalurgia pueden resultar más económicos que los basados en pirometalurgia porque son menos exigentes energéticamente y permiten aprovechar mayor cantidad de producto. La orientación de este trabajo es recuperar la mayor cantidad posible de sustancia con el mejor rendimiento; de esta forma se han considerado los aspectos económicos derivados de la recuperación de las pilas, mientras que los aspectos ambientales han quedado relegados en segundo plano.

## 1. ANTECEDENTES

El zinc es un componente natural de la corteza terrestre y forma parte, también, del medio ambiente; se encuentra en la naturaleza en forma de sales minerales; es un material extremadamente versátil que desempeña un papel fundamental en los procesos industriales y procesos de laboratorios químicos. Entre las aplicaciones más importantes se puede mencionar: su uso como capa protectora o galvanizador para el hierro y el acero y como componente de distintas aleaciones, especialmente del latón. También, se utiliza en las placas de las pilas (baterías) eléctricas secas y en las fundiciones a troquel. El óxido de zinc, conocido como zinc blanco, se usa como pigmento en pintura. El zinc, también se utiliza en los suplementos dietéticos y en la rama de la medicina.

Después de revisar los tesarios virtuales de las universidades Rafael Landívar (URL), Universidad Mariano Gálvez (UMG) y del Valle de Guatemala (UVG) no se encontró información sobre la *recuperación de zinc a partir de desechos de baterías* o temas relativos con el reciclaje o recuperación de metales a partir de materiales desechados. Jose Eduardo del Cid Castillo desarrolló la investigación *Diseño experimental del proceso para la fabricación de sulfato de zinc pentahidratado a partir de esmitsonita extraída de la mina Caquipec, Cobán Alta Verapaz* asesorado por el Ing. Mariano Arturo José Eskenasy García de la Universidad De San Carlos De Guatemala durante el año 2011. En estas tesis se explica el procedimiento para la extracción de metales.

A nivel internacional se han desarrollado diversas investigaciones que se detallarán en orden de importancia para el presente trabajo. En el Salvador, durante el año 2010 Edwin Enrique Oswaldo Armas y Karen Liliana Castillo Méndez, realizaron la tesis *propuesta de un método para la recuperación de zinc de pilas alcalinas usadas bajo el enfoque de producción más limpia*. En el año 2010 en la Universidad Central de Ecuador, Pablo Luis Bonilla y Wilson Diego Muñoz realizaron la investigación *Recuperación y reutilización de componentes químicos provenientes de pilas y/o baterías por vía húmeda* que busca recuperar y reutilizar componentes provenientes de pilas o baterías desechadas.

En México, en la Universidad Tecnológica de Mixteca, el Dr. Guillermo Juárez elaboró el informe *Recuperación por vía hidrometalúrgico de oro, cobre y zinc contenidos en los circuitos impresos*. Por último, en México, durante el año 2006 José Antonio Guerra y Andrea Maritza Guevara publicaron el artículo *Recuperación de cinc, dióxido de manganeso y carbono de pilas usadas para el desarrollo de una tecnología de reciclado* de la Universidad Autónoma de Puebla. En los trabajos descritos anteriormente se especifican los métodos utilizados para la recuperación de metales y tratamientos para los desechos provenientes de las pilas y/o baterías alcalinas.

## 2. MARCO TEÓRICO

Los acumuladores eléctricos, mejor conocidos como pilas o baterías a nivel comercial, son dispositivos que convierten la energía química en energía eléctrica por un proceso químico. Esta energía resulta accesible mediante dos terminales llamadas polos o electrodos; uno es el positivo o ánodo y el otro es el negativo o cátodo; la reducción ocurre en el cátodo y la oxidación en el ánodo; la reacción se lleva a cabo hasta que se cierra el circuito o interruptor externo.

### 2.1. Características generales de los acumuladores eléctricos

“Una batería o pila es un dispositivo que convierte energía química contenida en sus materiales activos directamente a energía eléctrica por medio de una reacción electroquímica de oxidación-reducción (Redox)”<sup>1</sup>. Una batería se compone de una o más celdas conectadas en serie, paralelo o ambas dependiendo del voltaje y la capacidad deseada. En una celda el agente reductor pierde electrones oxidándose; el electrodo donde se observa la oxidación se llama ánodo; el otro electrodo gana electrones, por tanto, se reduce se le conoce como cátodo donde se verifica la reducción de la sustancia.

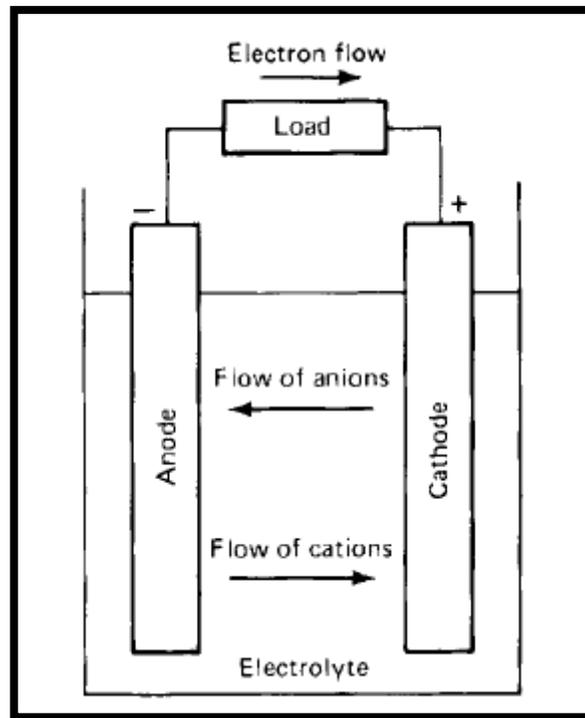
---

<sup>1</sup> LINDEN, David. *Handbook of batteries*. p. 37.

El electrolito es un conductor iónico que provee el medio para la transferencia de carga como iones dentro de la celda entre el ánodo y el cátodo; generalmente, es un líquido como agua u otros disolventes, con sales disueltas, ácidos, para aportar el efecto de conductividad.

La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo porque hay una diferencia de energía potencial entre los electrodos, este valor es medido experimentalmente con un voltímetro donde la lectura es el voltaje en cada celda. Para obtener energía eléctrica es necesario conectar los electrodos de la batería al aparato o instrumento que se desea hacer funcionar por medio de la utilización de conductores eléctricos externos.

Figura 1. **Operación electroquímica de una celda**



Fuente: LINDEN, David. *Handbook of batteries*. p. 40.

Una celda es la unidad básica electroquímica que proporciona una fuente de energía mediante una conversión directa de energía química. La celda está compuesta por electrodos, electrolito, contenedores y terminales; la batería se compone de un conjunto de celdas que utiliza para proveer la tensión eléctrica de servicio.

## **2.2. Clasificación de las baterías**

### **2.2.1. Pilas primarias**

Es un dispositivo cuyo diseño está basado en una reacción química irreversible por lo cual no es recargable; es decir, posee un solo ciclo de vida. No son capaces de hacer fácilmente una recarga eléctrica, por lo tanto, una vez se descargan son desechadas. Las celdas en las cuales el electrolito está contenido en un material absorbente o de separación se denominan celdas secas; la batería primaria proporciona una fuente de poder ligero para dispositivos electrónicos y eléctricos y otras aplicaciones.

### **2.2.2. Pilas secundarias**

Es un dispositivo cuyo diseño está basado en una reacción química reversible, es decir, un sistema recargable; se pueden reintegrar sus elementos activos suministrando una corriente eléctrica en sentido contrario al de la descarga por lo cual posee ciclos de vida múltiples. Son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica también conocidos como baterías o acumuladores. Las aplicaciones de las pilas secundarias se dividen en dos categorías.

### 2.2.2.1. Dispositivo de almacenamiento

La pila se utiliza como dispositivo de almacenamiento de energía; por lo general está conectada eléctricamente y proporciona una fuente de energía primaria. Algunos ejemplos: los vehículos híbridos y fuentes de emergencia tipo (UPS).

### 2.2.2.2. Dispositivo de pila primaria

Se caracteriza por su capacidad para ser recargada, por su alta densidad de potencia, tasa de descarga alta y su buen rendimiento a bajas temperaturas. Su densidad de energía es menor que el de la pila primaria, su retención de carga también es menor, pero cuenta con la ventaja de que la capacidad de la pila que se pierde al estar en uso puede ser restaurado.

Tabla I. Clasificación y características de las pilas

Tipo de pila	Característica
Pila de zinc-carbono	La pila de celda seca de Leclanché o de zinc-carbono por muchos ha sido la más utilizada de todas las pilas secas debido a su bajo costo, el rendimiento relativamente bueno y la disponibilidad inmediata.
Pila alcalina de zinc /dióxido de manganeso.	Este sistema se ha convertido en la pila de elección debido a su rendimiento de corriente superior más alto a bajas temperaturas y de mejor vida útil. Si bien es más caro que la pila de Leclanché, es más rentable para aquellas aplicaciones que requieren de alta velocidad o de baja capacidad de temperatura donde la pila alcalina puede superar a la pila de Leclanché por un factor de 2 a 10.

Continuación de la tabla I

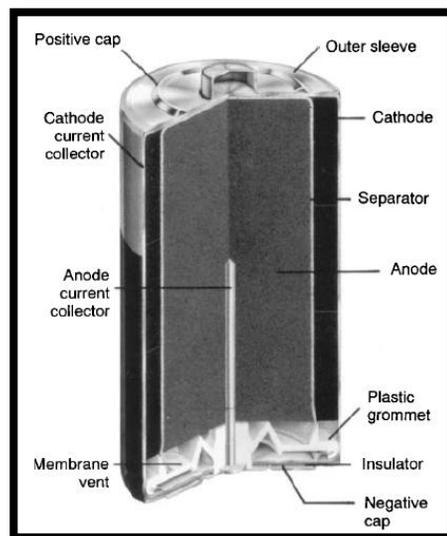
<p>Pila de zinc / óxido de mercurio</p>	<p>La pila de zinc - óxido de mercurio es otro sistema primario de ánodo de Zinc. Es utilizada como fuente de energía en los relojes electrónicos, calculadoras, audífonos, equipos fotográficos y aplicaciones similares que requieren una fiabilidad a largo plazo en una fuente miniatura de corriente.</p>
<p>Pila de cadmio / óxido de mercurio</p>	<p>Debido a su tensión voltaica más baja, la capacidad de vatios-hora de esta pila es de aproximadamente el 60 % de la capacidad de la pila de zinc / óxido de mercurio. Esta batería tiene una vida útil de hasta 10 años, así como su rendimiento a temperaturas altas y bajas.</p>
<p>Pila zinc / óxido de plata</p>	<p>La pila de zinc/ oxido de plata es similar en diseño a la de pila de botón de zinc / óxido de mercurio, pero tiene una densidad de energía mayor (en función del peso) y un mejor rendimiento a bajas temperaturas. Estas características hacen de este sistema de pila conveniente para el uso en aparatos auditivos, aplicaciones fotográficas y relojes electrónicos.</p>
<p>Pilas de magnesio</p>	<p>Mientras que el magnesio tiene propiedades electroquímicas atractivas, existe un interés comercial relativamente poco en las pilas de magnesio, debido a la generación de gas de hidrógeno durante la descarga y el almacenamiento relativamente pobre de una celda de una descarga parcial.</p>

Fuente: elaboración propia.

### 2.3. Composición de las pilas alcalinas

“El ánodo de las pilas alcalinas contiene zinc en polvo con una sustancia inhibidora de la corrosión y el compacto cátodo de óxido de manganeso está mezclado con carbón grafito y negro de acetileno, el dióxido de manganeso obtenido por medios electrolíticos es el que provee capacidad y mayor reactividad a las pilas alcalinas en comparación con las pilas zinc-carbón”<sup>2</sup>. Las pilas alcalinas son una versión mejorada de la pila de zinc/cloruro con la cual se ha sustituido el ion coluro de amonio por hidróxido potásico de allí su nombre alcalino.

Figura 2. Esquema de una pila alcalina



Fuente: LINDEN, David. *Handbook of batteries*. p. 62.

<sup>2</sup> OSWALDO, Edwin; ZENAYDA, Karen. *Propuesta de un método para la recuperación de zinc de pilas alcalinas usadas bajo el enfoque de producción más limpia*. p. 54.

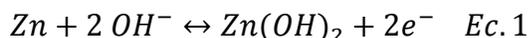
Posee un contenido menor al 0,1 % de mercurio, por lo cual es una versión mejorada, el recipiente es de acero y la disposición del zinc y del manganeso es la contraria, siendo el zinc contenido en polvo en el centro.

Esto le confiere a la pila mayor duración, mejor rendimiento y estabilidad en el tiempo de uso. Suministra una fuerza electromotriz de 1,5 V y se utiliza en la mayoría de casos en aparatos de mayor consumo: juguetes, equipos portátiles o electrónicos. El ánodo de zinc amalgamado y el cátodo es un material despolarizador que es con base en el óxido de manganeso; el electrolito es una solución de hidróxido de potasio el cual presenta una resistencia interna baja que permite que no existan descargas internas y la energía pueda ser acumulada durante un mayor periodo de tiempo.

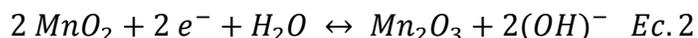
El zinc en polvo empleado en las pilas alcalinas debe ser de alta pureza y generalmente se produce por electrolisis; en estas condiciones se esperaría que el 100 % del zinc activo se emplee en el proceso final, pero únicamente el 30 % del zinc se usa para generar la capacidad eléctrica de la pila. Existen múltiples posibilidades para el tratamiento o disposición de pilas agotadas que varían en cuanto a su requerimiento energético, nivel de reducción del impacto ambiental y costo principalmente.

### **2.3.1. Reacciones de la pila alcalina**

La reacción en el ánodo es:



La reacción en el cátodo es:



### 2.3.2. Tamaños y diseños de las pilas

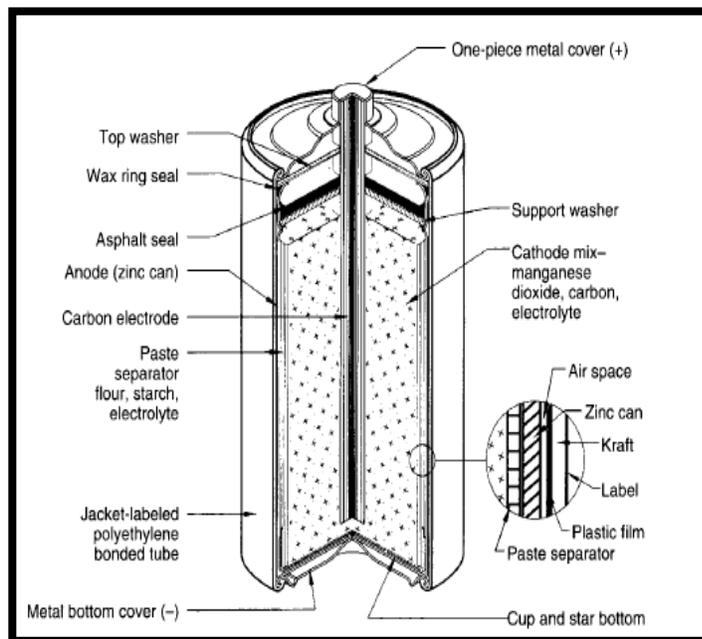
Las pilas anteriores se diseñan en diferentes formas y tamaños:

- Redondas o cilíndricas
- Pilas tipo botón
- Pilas prismáticas

#### 2.3.2.1. Redondas o cilíndricas

Este tipo de pila está caracterizado por un diseño de pila con diámetro  $D$  y altura  $H$ , donde  $H > D$  son en su mayoría celdas de tipo primario.

Figura 3. Pilas cilíndricas



Fuente: LINDEN, David. *Handbook of batteries*. p. 77.

## 2.4. Pirometalurgia

Se entiende que un método pirometalúrgico es aquel donde se producen metales a temperaturas elevadas. Las principales operaciones pirometalúrgicas son: calcinación, tostación, fusión, volatilización, metalotermia, electrolisis ígnea. Como en todos los procesos, en la implementación de este proceso se debe tomar en cuenta sus ventajas y desventajas.

- Ventajas
  - Velocidades de reacción muy rápidas
  - Producción elevada en grandes instalaciones
  - Tratamiento de materias primas complejas
  
- Desventajas
  - Poca selectividad y eficiencia de las reacciones químicas
  - Obtención de materiales impuros
  - Problemas de contaminación ambiental
  - Consumo energético elevado

“La pirometalurgia se ocupa de aquellos procesos que dependen del calor o de la acción de los productos de la combustión para conseguir la reducción de los metales”<sup>3</sup>. Es uno de los métodos más antiguos para la obtención de metales a partir de sus menas, se trata de extraer de las sales minerales el metal por separación y purificación en un rango de temperaturas elevadas.

---

<sup>3</sup> ROMAN ORTEGA, Francisco. *Introducción a la recuperación y reciclado de metales no férreos*. p. 17.

## **2.5. Hidrometalurgia**

“La metalurgia extractiva es la rama de la ingeniería que involucra las operaciones asociadas al beneficio, concentración y extracción de metales y/o compuestos, aplicando las leyes de la mecánica y la termodinámica a las operaciones de reducción de tamaño, separación sólido-sólido y sólido-líquido. En general se define como el arte de extracción mediante métodos físico-químicos; cuando estos se desarrollan en medio acuoso se definen como hidrometalurgia, cuando se desarrolla a altas temperaturas pirometalurgia y por último la electrometalurgia corresponde a los métodos electrolíticos, aunque esta última se encuentra integrada a los dos procesos mencionados anteriormente”.<sup>4</sup>

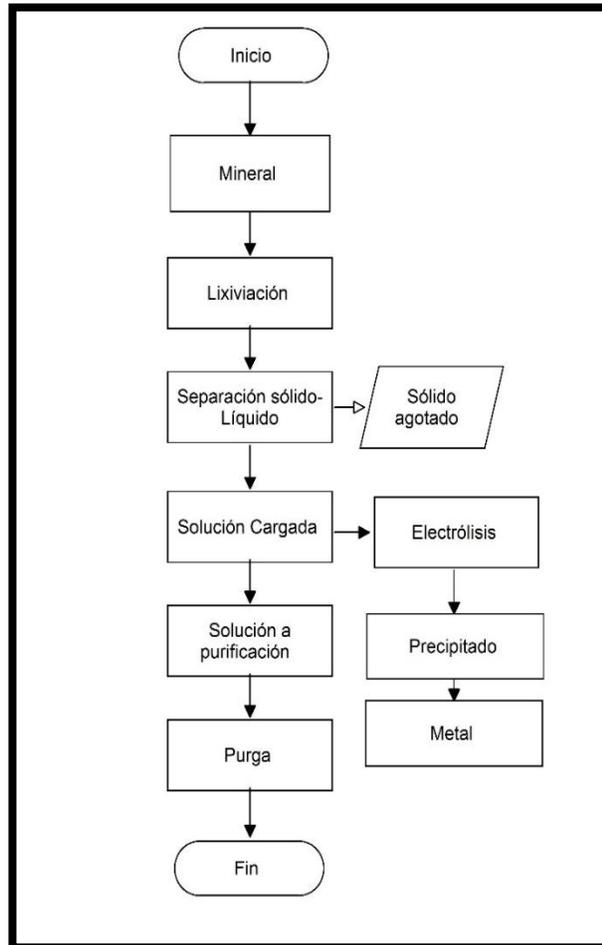
### **2.5.1. Aplicación de la hidrometalurgia**

En la hidrometalurgia se emplean soluciones acuosas para la obtención de los metales de interés. Es posible operar económicamente con pequeñas plantas, diseñándolas a la medida de la fuente del mineral que se va a extraer, mientras que la pirometalurgia no ofrece esta facilidad al tener requerimientos energéticos muy elevados. La existencia de muchas posibilidades de trabajo dificulta encontrar la opción más favorable, sin embargo, la elección se limita en tanto que para un metal determinado solo es posible dos o tres combinaciones económicamente rentables. La etapa de lixiviación corresponde a la disolución selectiva de los metales de interés, contenidos en los minerales hacia el medio acuoso, el cual porta los reactivos modificadores adecuados, el agente lixivante encargado de realizar la disolución por reacciones oxido-reducción.

---

<sup>4</sup> GAVIRIA, Ana; RESTREPO, Oscar. *Hidrometalurgia aplicada a line de metales preciosos*. p. 71.

Figura 4. **Proceso físico-químico de la hidrometalurgia**



Fuente: elaboración propia.

La separación sólido-líquido se encarga de recoger adecuadamente por decantación, sedimentación o filtración, la solución enriquecida con los metales disueltos, mientras que el sólido agotado es enviado para tratamiento y desecho. La solución cargada con los metales disueltos pasa a la etapa de recuperación selectiva o precipitación donde pasa a otros procesos como la electrólisis en donde se recupera el metal como un producto sólido.

La solución residuo puede ser enviada luego a su regeneración al proceso en la etapa de lixiviación o bien, si su capacidad se ha agotado, es desechada como purga del sistema tomando en cuenta realizar el proceso adecuado de neutralización antes de su descarga hacia el medio ambiente.

Tabla II. **Comparación entre la hidrometalurgia y pirometalurgia**

Variable	Hidrometalurgia	Pirometalurgia	Observación
Consumo de energía	Ventaja	Desventaja	Las plantas hidrometalúrgicas tienen bajo consumo de combustible dado que se llevan a cabo a temperatura ambiente o menor a los 100°C.
Tiempo de proceso	Desventaja	Ventaja	La hidrometalurgia requiere tiempos mayores de reacción.
Contaminación	Desventaja	Desventaja	Ambos procesos poseen residuos que deben ser tratados para su respectivo desecho y no generar contaminación ambiental.
Economía	Ventaja	Desventaja	Los procesos pirometalúrgico requieren elevado consumo de energía.

Fuente: elaboración propia.

## **2.5.2. Especificaciones del método de la hidrometalurgia**

### **2.5.2.1. Lixiviación**

El escoger un reactivo que funcione como lixivante debe considerar varios factores:

- Costo del reactivo
- Selectividad del agente lixivante
- Carácter físico-químico
- Capacidad para ser regenerado y reintegrado al proceso

En este orden se puede clasificar los agentes lixivante como:

- Agua
- Soluciones de sales acuosas
- Soluciones ácidas
- Soluciones básicas

Debido a estas consideraciones es lógico considerar que los procesos hidrometalúrgicos involucran reacciones heterogéneas, por lo cual es necesario que se realice en forma general un reconocimiento de la estructura en la fase sólida y considerar la fase líquida.

### **2.5.2.2. Estructura de los minerales**

La estructura cristalina de los minerales está basada en la unión entre átomos, las uniones pueden realizarse por enlaces primarios o secundarios dependiendo de la energía que interviene.

Los enlaces atómicos primarios son aquellos que desarrollan grandes fuerzas interatómicas se dividen en: metálicos, iónicos y covalentes; los defectos en la estructura cristalina de los materiales ocasiona desviaciones de la idealidad y esto a su vez genera variaciones en las propiedades que caracterizan al material.

## **2.6. Análisis gravimétrico o gravimetría**

“El análisis gravimétrico o análisis cuantitativo por pesadas consiste en separar y pesar, en el estado de mayor pureza, después de un tratamiento adecuado, un elemento o compuesto de composición definida con la sustancia que se determina. El elemento o compuesto así separado y pesado, corresponde una porción pesada de la muestra en el análisis”<sup>5</sup>. Es recomendable en las determinaciones gravimétricas la completa transformación del elemento en una sustancia pura y estable, los métodos se clasifican de acuerdo a la forma de separación de la sustancia que se determina.

- Precipitación
- Volatilización o desprendimiento
- Electroanálisis
- Otros métodos

### **2.6.1. Electroanálisis**

Por este método el elemento se deposita por medio de electrólisis como tal o como un compuesto sobre un electrodo.

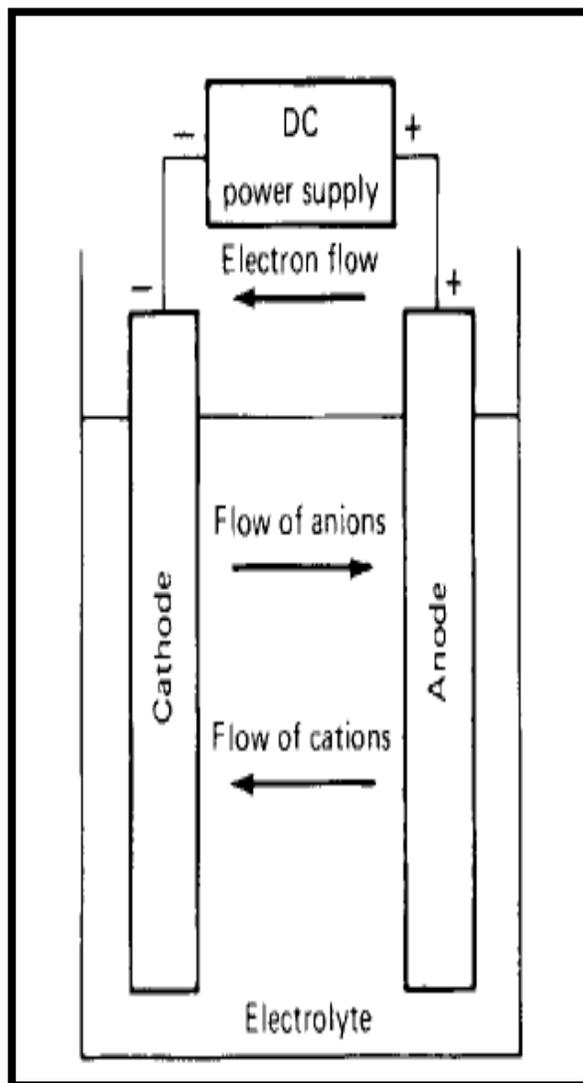
La ventaja de su utilización es debido a que se evita el proceso de filtración y a la difícil formación de coprecipitación en las condiciones

---

<sup>5</sup> VOGEL, I. Arthur. *Química analítica cuantitativa*. p. 231.

experimentales por precipitación. Las cantidades de sustancias liberadas en los electrodos son proporcionales a la cantidad de electricidad que pasa por la solución.

Figura 5. **Esquema de una celda de electroanálisis**



Fuente: LINDEN, David. *Handbook of batteries*. p. 77.

Las leyes de Faraday para electrólisis establecen: “las cantidades de sustancia liberadas son proporcionales a la cantidad de electricidad que pasa por la solución y las cantidades de las diferentes sustancias, que son depositadas por la misma cantidad de electricidad, son proporcionales a sus equivalentes químicos”<sup>6</sup>. Se deben tomar en cuenta las características del elemento o depósito que se adhiere al electrodo; entre estas se pueden mencionar:

- Adherente al electrodo
- Coherente
- Compacto

Para que se pueda separar el elemento de la solución y lavar sin riesgo de pérdidas, se debe tomar en cuenta la agitación mecánica en el proceso; por lo general, esta mejora las características de adhesión al electrodo y disminuye la posibilidad de grandes variaciones de concentración en las proximidades a los electrodos. Para densidades de corriente elevadas puede desprenderse hidrógeno lo cual afecta el depósito del metal, por esta razón se recomienda utilizar ácido nítrico para la determinación de ciertos metales para evitar el desprendimiento de burbujas.

## **2.7. Espectrometría de absorción atómica**

La espectrometría de absorción atómica (AAS) ha sido uno de los métodos ópticos más ampliamente utilizados para la determinación de diferentes elementos.

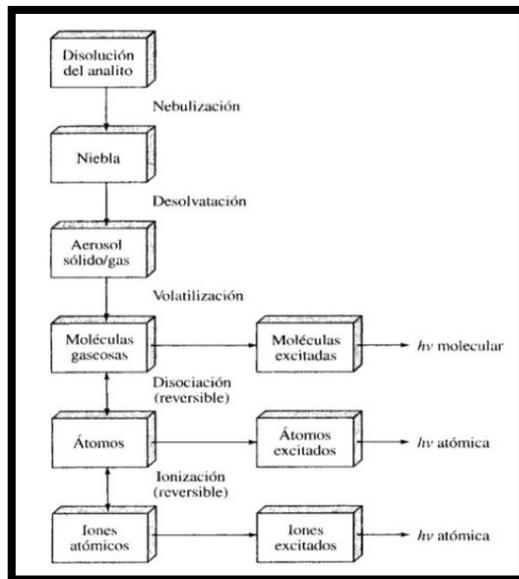
---

<sup>6</sup> VOGEL, Arthur. *Química analítica cuantitativa*. p. 41.

### 2.7.1. Atomización con llama

“En un medio gaseoso a elevada temperatura, los átomos son capaces de absorber la radiación de las longitudes de onda características de las transiciones electrónicas de estados bajos a estados de nivel más excitado, así un espectro de absorción atómico característico consta principalmente de líneas de resonancia que son el resultado de transiciones desde el estado fundamental a niveles superiores”<sup>7</sup>. En este proceso, la disolución de la muestra es regulada mediante un flujo de gas oxidante mezclado con gas combustible que posteriormente es llevado a la llama donde se produce la atomización.

Figura 6. Proceso de atomización



Fuente: SKOOG, Douglas; HOLLER F, James; NIEMAN A, Timothy. *Principios del análisis instrumental*. p. 453.

<sup>7</sup> SKOOG, Douglas; HOLLER F, James; NIEMAN A, Timothy. *Principios del análisis instrumental*. p. 453.

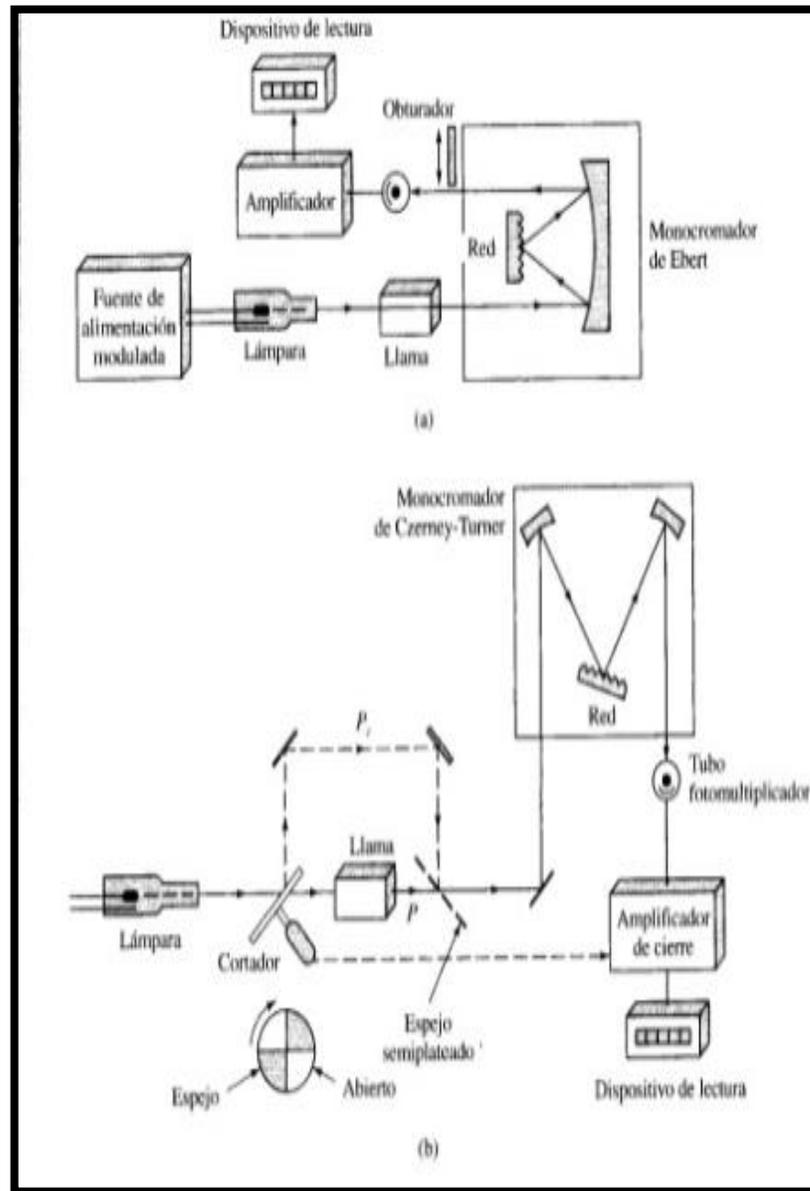
### **2.7.2. Instrumentación para absorción atómica**

Los instrumentos utilizados en este proceso son: una fuente de radiación, una zona de muestra, un selector de longitud de onda, un detector, un procesador de señal y un procesador de salida de lectura. La zona de muestra en un instrumento de absorción atómica es el atomizador que contiene la muestra gaseosa atomizada; este método analítico es específico debido a que las líneas de absorción son considerablemente estrechas y las energías de transición electrónica son únicas para cada elemento.

La mayoría de los instrumentos que actualmente son comercializados vienen equipados con ordenadores que se utilizan para el control de los parámetros instrumentales y para el control y manejo de los datos. Entre estos se pueden mencionar: los de haz sencillo y de haz doble. Hay que resaltar que en los instrumentos de doble haz, el haz de referencia no pasa por la llama y, por consiguiente, no existe una corrección de pérdida de potencia radiante debida a la absorción o dispersión de la radiación por la propia llama.

En los métodos de absorción se presentan dos tipos de interferencia: las espectrales se producen cuando la absorción de una especie interferente aparece próxima a la del analito y las interferencias químicas se presentan como consecuencia de diversos procesos químicos que ocurren durante la atomización y que alteran las características de absorción de la muestra.

Figura 7. Espectrofotómetros de llama de haz sencillo y doble



Fuente: SKOOG, Douglas; HOLLER F, James; NIEMAN A, Timothy. *Principios del análisis instrumental*. p. 453.



### 3. METODOLOGÍA

A continuación, se detalla la metodología para el proceso de recuperación de zinc metálico a partir del desecho de pilas alcalinas a nivel de laboratorio.

#### 3.1. Variables

A continuación, se detallan las variables ligas directamente al proceso y que poseen influencia directa en el resultado.

##### 3.1.1. Variables independientes

Tabla III. Variables independientes

Variable	Símbolo	Unidad	Descripción
Concentración especie i	$C_i$	mol/L	Se utiliza en el proceso de lixiviación, para la concentración requerida de los reactivos y productos.
Tiempo	t	min	El tiempo va muy ligado a los procesos de extracción del zinc.
Temperatura	T	°C	Se liga con todos los procesos que se realizarán en este trabajo. Para las disoluciones.

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Variables dependientes

A continuación, se presenta el listado de variables dependientes y su relación de importancia con el trabajo.

Tabla IV. Variables dependientes

Variable	Símbolo	Unidad	Descripción
Masa especie i	$m_i$	g	Se busca la extracción de la mayor cantidad posible de zinc a partir de las pilas.

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio se limita únicamente a la extracción del zinc metálico proveniente de pilas alcalinas doble A, evaluando el método hidrometalúrgico a condiciones de temperatura en intervalo de 10°C - 90 °C y concentraciones 0,1M - 0,9 M. Se analizarán muestras de 1 pila utilizando como agente lixivante soluciones de ácido nítrico y reconstituyendo la sustancia con ácido bórico a diferentes concentraciones. La investigación se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico y Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, bajo la supervisión de: Ing. William Eduardo Fagiani Cruz, M.Sc. Félix Ricardo Véliz Fuentes y Licda. Bessie Evelyn Oliva Hernández.

### 3.3. Recurso humano disponible

- Desarrollo del proyecto: Herbert Fernando Castro Abal, estudiante de ingeniería química.
- Asesor: Ingeniero Químico William Eduardo Fagiani Cruz.
- Coasesor: M.Sc. Félix Ricardo Véliz Fuentes.
- Coasesora: Licda. Bessie Evelyn Oliva Hernández.

### 3.4. Recurso material disponible

#### 3.4.1. Equipos

Tabla V. **Equipo**

No.	Nombre del equipo	Marca
1	Balanza analítica	Sartorius
2	Sierra para metal	Sandalex
3	Alicate o pinza	Stanely
4	Horno de secado	Premlab
5	Plancha	Lab-Line
6	Campana de extracción de gases	Serproma
7	Agitadores magnéticos	PCE-MSR 300
8	Plancha de calentamiento con agitación	Corning Pc-4200
9	Regulador de corriente	Power supply Cp 6-A
10	Multímetro digital	Fulgore FUQ 235
11	Espectrómetro de absorción atómica	Thermo Electron Solar S2

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Cristalería y accesorios**

<b>No.</b>	<b>Nombre</b>
1	Crisol gooch de porcelana
2	<i>Beackers</i> de vidrio, marca Pyrex, diversos tamaños
3	Probetas 10, 50 ml
4	Varilla de agitación
5	Pinzas de metal
6	Balones aforados de 50, 100, 1000 ml
7	Embudo <i>buchner</i> de porcelana
8	Termómetros
9	Embudo de vidrio
10	Mortero con pistilo, de porcelana
11	Desecador de vidrio
12	Vidrio de reloj, marca pyrex
13	Núcleos de ebullición vidrio
14	Papel filtro grado GF/D marca Whatman
15	Jeringas de plástico 10 ml plastipak
16	Vasos de vidrio para digestión marca pyrex
17	Papel lija calibre 250 marca Imperial

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.2. Materiales

Materia prima necesaria para realizar el estudio; son las pilas alcalinas desechadas que se obtendrán de empresas recolectoras de chatarra y aporte de contribuyentes en general; únicamente utilizándose pilas AA de diferentes marcas para el análisis.

### 3.4.3. Reactivos

Tabla VII. **Reactivos**

No.	Nombre
1	Agua desmineralizada
2	Ácido bórico grado reactivo
3	Ácido clorhídrico grado reactivo
4	Ácido nítrico grado reactivo
5	Ácido sulfúrico, grado reactivo 98 %
6	Extran® MA 01 líquido, alcalino
7	Sulfato de zinc
8	Ácido nítrico ultra puro

Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Esta investigación será de carácter cuantitativo, experimental y comparativo ya que se medirá la cantidad de metal zinc recuperado de las pilas alcalinas a condiciones de temperatura en un rango de 10 °C – 90 °C y concentraciones 0,1 M - 0,9 M de ácido bórico como electrolito determinando el valor óptimo y la relación costo beneficio.

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

#### 3.6.1. Ubicación de la recolección

La investigación se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico y Ambiental de la Facultad Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### 3.6.2. Proceso de recolección

Metodología para la recuperación de zinc a escala de laboratorio. El procedimiento experimental global para la recuperación del zinc desarrollado a continuación comprende dos partes:

- Extracción del zinc del ánodo de la pila y proceso de digestión (Lixiviación)
- La recuperación de zinc extraído mediante una celda de electrodeposición

#### 3.6.2.1. Desmantelamiento de la pila

- En el proceso de obtención de materia prima se procede a cortar de manera tangencial la pila alcalina empleando una sierra para metal. El corte debe estar desplazado del centro para no tocar el ánodo, posteriormente, se hace un corte transversal cerca del extremo negativo para separar el recolector del ánodo.

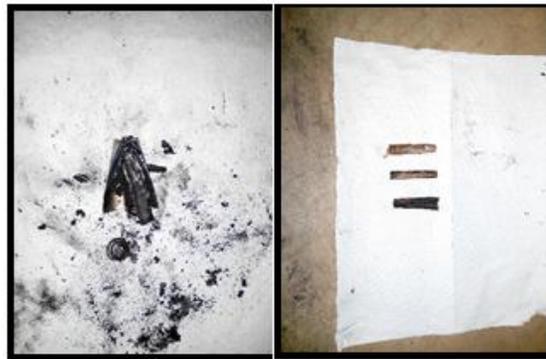
Figura 8. Desmantelamiento de la pila



Fuente: elaboración propia.

- Posteriormente, se extrae el ánodo procurando que no se desprenda del papel que lo envuelve.

Figura 9. **Extracción de ánodo**



Fuente: elaboración propia.

- Desprendido el ánodo, se preparan las cápsulas de porcelana calentando en el horno para eliminar cualquier rastro de humedad por 45 min a 85 °C.

Figura 10. **Secado de cápsulas**



Fuente: elaboración propia.

- Se dejan reposar las cápsulas en un desecador, se procede a pesar y anotar los pesos de cada cápsula.

Figura 11. **Pesado de cápsulas**



Fuente: elaboración propia.

- Se introducen los ánodos en cada cápsula y se realiza un secado inicial de 10 min a 85 °C.

Figura 12. **Secado de ánodo**



Fuente: elaboración propia.

- Se retira cuidadosamente el papel protector que envuelve al ánodo utilizando pinzas metálicas para no contaminar la muestra y se introducen nuevamente al horno, se seca el ánodo por 45 min a 85 °C.
- Se deja reposar por 15 min en un desecador, se procede a pesar cada cápsula y anotar su valor.

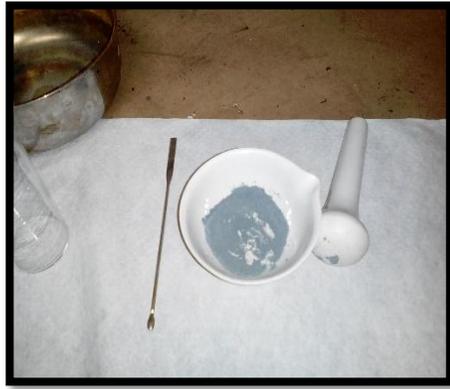
Figura 13. **Peso final de cápsula y ánodo**



Fuente: elaboración propia.

- Se tritura el producto en un mortero hasta llevarlo a un tamaño de partícula adecuado.

Figura 14. **Reducción del tamaño de la partícula**



Fuente: elaboración propia.

- Se almacena el material fino en un recipiente limpio y seco con tapa.

Figura 15. **Almacenamiento**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.2.2. Proceso de lixiviación

- Este proceso, también conocido como digestión, se utiliza para extraer o separar el elemento de interés del resto de componentes del ánodo.
- Se preparan los vasos para digestión marca pyrex, se procede a pesar cada vaso y anotar su valor.

Figura 16. Medición de peso de vasos



Fuente: elaboración propia.

- Se pesan 2,00 gramos de ánodo en cada vaso y se cubre con un vidrio de reloj para evitar contaminación de la muestra.
- Se agregan núcleos de ebullición a cada vaso, posteriormente se mide un volumen de 10 ml de ácido nítrico y se adiciona la misma cantidad a cada vaso. Todo el procedimiento se realiza en una campana de extracción para protegerse de los gases liberados; se cubren nuevamente con un vidrio de reloj cuyo propósito es crear un reflujo al momento de la digestión.

Figura 17. **Preparación de la digestión con ácido nítrico**



Fuente: elaboración propia.

- Se digieren las muestras calentando la solución en baño de María en un calentador o plancha hasta que la solución alcance una temperatura de 90 °C por un tiempo de 1 hora para eliminar los restos de ácido nítrico.

Figura 18. **Digestión de la muestra de ánodo**



Fuente: elaboración propia.

- Se obtiene una solución final luego de la digestión y evaporación del ácido nítrico, se deja reposar la solución a temperatura ambiente.
- Se pesan los papeles filtro y se anota su valor.

Figura 19. **Pesado de papel filtro**



Fuente: elaboración propia.

- Se filtra la solución resultante con papel filtro previamente pesado y se cubre cada muestra con papel parafilm para almacenarlo.

Figura 20. **Filtrado y almacenamiento de solución**



Fuente: elaboración propia.

- Se seca el papel filtro, con el sólido retenido, durante 24 horas, a temperatura ambiente, en un lugar seco. Al concluir dicho tiempo, se calienta el papel filtro a 50 °C durante 1 hora y se pesa posteriormente para encontrar la cantidad de material no disuelto.

Figura 21. **Pesado de papel filtro, final**

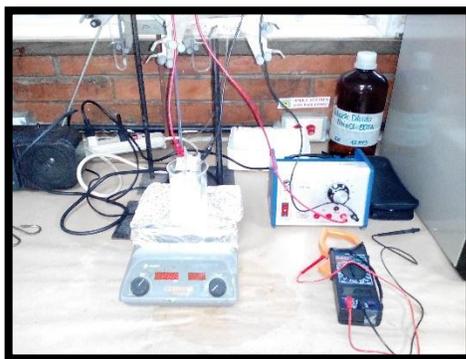


Fuente: elaboración propia.

### 3.6.2.3. Proceso de electrodeposición del zinc

- Se reconstituye la solución resultante, con soluciones de ácido bórico en concentraciones 0,1 M, 0,5 M, 0,9 M en un *beacker* de 250 ml para tener un volumen final de 200 ml.
- Se extraen 30 ml de la solución reconstituida resultante para analizarla en el (AAS) y determinar la concentración de zinc disuelto en la muestra.
- Se construye una celda electroquímica.

Figura 22. Celda electroquímica



Fuente: elaboración propia.

- El recipiente que contiene el electrolito es un *beaker* de 250 ml al cual se le provee agitación magnética a 220 rpm.
- Para que la electrodeposición se lleve a cabo, el sistema se debe armar con láminas de acero (será el cátodo de la celda) y de aluminio (será el ánodo de la celda) de 5 cm X 10 cm, previamente limpiadas y pulidas con papel lija.

Figura 23. **Láminas de acero y aluminio**



Fuente: elaboración propia.

- Luego se someten a un desengrase empleando como solvente Extran® MA 01 líquido alcalino; posteriormente, se llevan a un proceso de decapado con solución de HCl al 20 % P/V para retirar las capas de óxido por frotación y enjuague.

Figura 24. **Proceso de limpieza y decapado**



Fuente: elaboración propia.

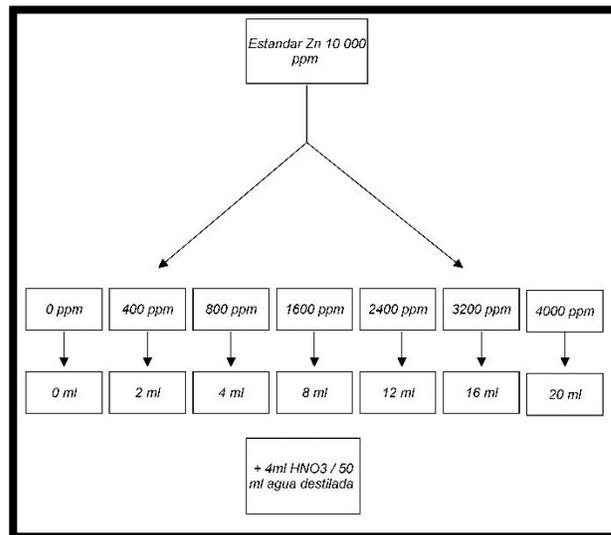
- Se dejan reposar las láminas a temperatura ambiente para secarlas y posteriormente pesarlas.
- Con el previo registro de su peso, las láminas se llevan a la celda electrolítica en la cual actúan como cátodo y ánodo respectivamente.
- Se inicia el proceso de electrodeposición haciendo circular una determinada corriente eléctrica a través del circuito durante un tiempo definido.
- Al finalizar, se retira la lámina, se lava con agua destilada cuidadosamente para no afectar el contenido de zinc recuperado y se seca en un horno a  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  para registrar su peso.

### **3.6.3. Proceso de análisis por espectrofotometría de absorción atómica**

- Se debe preparar una solución estándar (patrón) de zinc, para la preparación de la curva de calibración que se utilizará en el análisis AAS.
- Se debe preparar un patrón de zinc con las características de concentración 10 000 ppm al 4 % de  $\text{HNO}_3$ .
- Pesar 23 1634 g de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , medir 31 ml de  $\text{HNO}_3$  ultra puro, aforar en un balón de 500 ml con agua ultra pura.
- Con el estándar (patrón) de zinc, preparar la curva de calibración para el análisis en AAS en un rango de concentraciones de 0,00 a 4 000 ppm.

- Para preparar la curva, se toman alícuotas a diferentes volúmenes de la solución estándar; se agrega un volumen de 4 ml  $HNO_3$  a cada balón y se aforan a 50 ml con agua destilada.
- Se preparan muestras a 7 concentraciones diferentes para obtener una curva de 7 puntos tomando en cuenta el blanco que se prepara únicamente con 4 ml  $HNO_3$  y se afora a 50 ml con agua destilada.
- Se agitan los balones y se deja reposar por 10 min.

Figura 25. **Curva de calibración Zn (AAS)**



Fuente: elaboración propia.

- Se preparan las muestras que serán analizadas en el AAS, se toman 10 ml de la muestra, se agregan 4 ml de  $HNO_3$  y se afora con agua destilada a un volumen final de 25 ml.

- Se prepara el equipo de espectrofotometría de absorción atómica, ajustando los parámetros respectivos para realizar el análisis de concentración de zinc en la muestra.

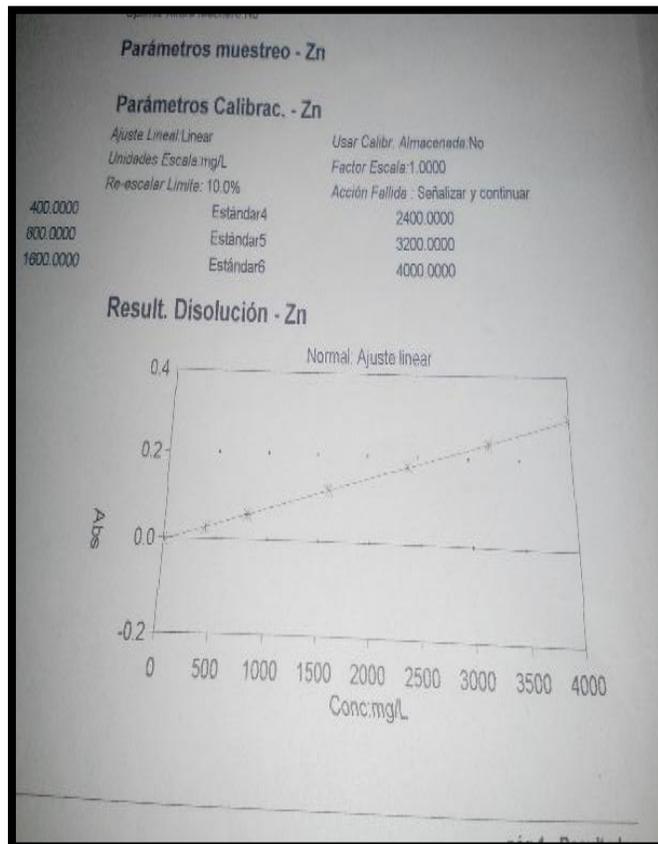
Figura 26. **Espectrofotómetro de absorción atómica**



Fuente: elaboración propia.

- Se analiza la curva de calibración con las 7 concentraciones diferentes para obtener un modelo de comportamiento lineal.

Figura 27. Curva de calibración Zn por AAS



Fuente: elaboración propia.

- Debe obtenerse un 99 % de precisión para validar la curva de calibración y proceder a analizar las muestras, de lo contrario preparar una nueva curva.
- Si la curva es válida, se procede a analizar la concentración de Zn en cada una de las muestras.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Tabla VIII. Datos a utilizar en la electrodeposición

Área del cátodo	0,0020 $m^2$
Área del ánodo	0,0020 $m^2$
Volumen del electrolito	170 ml
Agitación	220 rpm
Distancia entre electrodos	0,020 m

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Tabulación de datos 1

N	$M_a$	$m_b$ (g)	$\Delta I$	$m_{cco}$ (g)	$\Delta I$	$m_{ccf}$ (g)	$\Delta I$	$HNO_3$ (ml)	$m_{am}$ (g)		$\Delta I$
1											
2											
3											

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Tabulación de datos 2

$m_{po}$ (g)	$\Delta I$	$m_{pf}$ (g)	$\Delta I$	$v$ (V)	$\Delta I$	$T$ ( $^{\circ}C$ )	$\Delta I$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Tabulación de datos 3**

$C_b (M)$	$t (min)$	$\Delta l$	$m_{co} (g)$	$\Delta l$	$m_{ao} (g)$	$\Delta l$	$m_{cf} (g)$	$\Delta l$	$m_{af} (g)$	$\Delta l$	$a (rpm)$	$A_p (m^2)$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Ordenamiento de datos**

		T = 25 °C									
		$m_{co} (g)$			$m_{cf} (g)$			$m_{zn} (g)$			
$C_b (M)$	$t (min)$	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	$\bar{m}_{zn} (g)$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Procesamiento de resultados**

T = 25 °C				
$C_b (M)$	$t (min)$	$\bar{m}_{zn} (g)$	$A_p (m^2)$	$m_{znT} (g/m^2)$

Fuente: elaboración propia.

### **3.8. Plan de análisis de resultados**

Los métodos de cálculo utilizados para tratar los datos empíricos obtenidos se detallan a continuación.

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

El carácter cuantitativo de la investigación indica la utilización de ecuaciones diseñadas para la obtención de los resultados. Se utilizará un método gravimétrico por electroanálisis para la obtención final de la masa de zinc en gramos recuperada.

$$m_{zn} = m_{cf} - m_{co}$$

Se graficará la cantidad en gramos de zinc recuperado a las diferentes condiciones trabajadas en función del tiempo requerido por electroanálisis. Se realizará un análisis AAS por llama para determinar la concentración de Zn presente en las muestras antes del electroanálisis.

#### **3.8.2. Programas a utilizar para el análisis de datos**

- Microsoft Excel 2013
- Microsoft Word 2013
- MINITAB 17

### 3.9. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se determinarán los errores de incertidumbre y precisión para los datos obtenidos.

#### 3.9.1. Error de incertidumbre

La incertidumbre se calcula de forma diferente dependiendo de si el valor de la magnitud se observa directamente en un instrumento de medida (medida directa) o si se obtiene manipulando matemáticamente una o varias medidas directas (medida indirecta).

Para determinar el error de incertidumbre se utilizará la incertidumbre de las medidas directas de los diferentes instrumentos o equipos utilizados para el análisis.

$$Error = \Delta x$$

#### 3.9.2. Error de precisión

El error de precisión se calcula utilizando el coeficiente de variación para corridas repetitivas.

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_i^n x_i}{N}$$
$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$
$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$$

### 3.9.3. Análisis de varianza

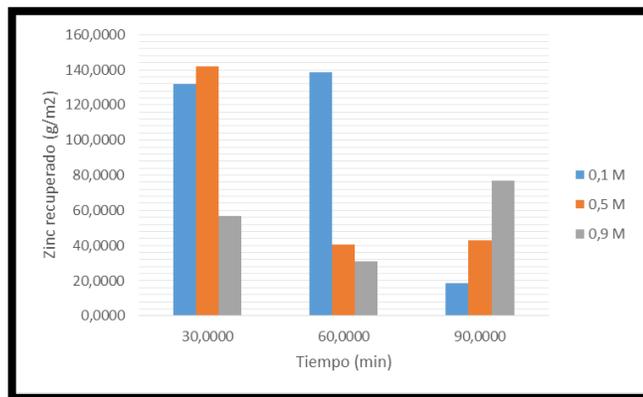
Para la metodología experimental propuesta se realizó un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial con repetibilidad, para determinar la diferencia existente entre los factores de estudio y la variable de respuesta: la temperatura, la concentración y el material recuperado. Se utilizó el software MINITAB 17, programa estadístico utilizado para analizar los resultados y determinar el ANOVA bifactorial con repetibilidad.

El análisis ANOVA permite obtener los estadísticos de prueba  $F_A$  en función de los resultados obtenidos por medio de un modelo estadístico de regresión lineal y compararlos con los valores críticos del modelo de Fischer  $f_{A,\alpha,I-1,IJ(K-1)}$  con número de grados de libertad y nivel de significancia del 5 %, lo cual permite admitir o rechazar las hipótesis planteadas. Si los valores de prueba son mayores a los valores críticos de Fischer, se rechaza la hipótesis nula  $H_{AB0}$ , en caso contrario se rechaza la hipótesis alternativa  $H_{AB1}$ .



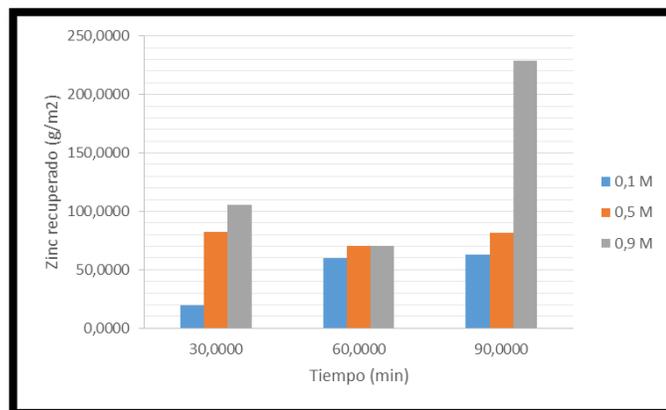
## 4. RESULTADOS

Figura 28. Zinc obtenido a T= 25 °C



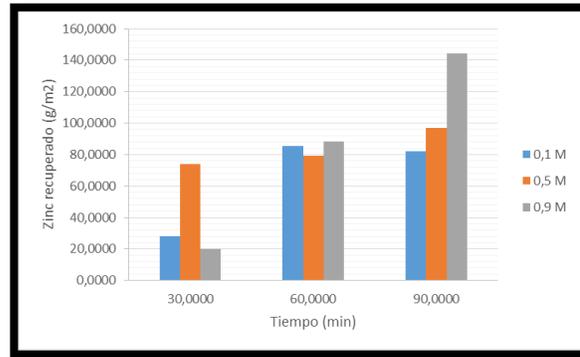
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Zinc obtenido a T= 40 °C



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Zinc obtenido a T= 85 °C



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Estadístico de Fischer, análisis (ANOVA)

<i>F Estadístico</i>	<i>f crítico de Fischer</i>	<b>Factor de rechazo <math>H_{i0}</math></b>
$F_A = 0,14$	$f_{A,0,05,2,18} = 3,55$	$F_A \geq f_{A,\alpha,I-1,IJ(K-1)}$
$F_B = 0,45$	$f_{B,0,05,2,18} = 3,55$	$F_B \geq f_{B,\alpha,J-1,IJ(K-1)}$
$F_{AB} = 1,39$	$f_{AB,0,05,4,18} = 2,93$	$F_{AB} \geq f_{AB,\alpha,(I-1)(J-1),IJ(K-1)}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Relación costo beneficio Zn

Venta zinc comercial	
Cantidad zinc	Precio
1 kilogramo	Q1 129,45
1 gramo	Q1,13
Relación costo beneficio	
Cantidad zinc a condiciones óptimas	Ingreso total
228,7500 gramos/ $m^2$	Q258,48
Porcentaje recuperación	22,89 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Desviación estándar y coeficiente de variación**

T = 25 °C		
$\bar{m}_{zn} (g)$	$\sigma$	CV (%)
0,2634	0,1402	53,2430
0,2769	0,1164	42,0292
0,0375	0,0257	68,6593
0,2841	0,0699	24,5978
0,0813	0,0374	46,0423
0,0858	0,0632	73,6254
0,1139	0,0687	60,3193
0,0621	0,0437	70,3674
0,1537	0,0294	19,1575
T = 40 °C		
$\bar{m}_{zn} (g)$	$\sigma$	CV (%)
0,0395	0,0272	68,9144
0,1203	0,0205	17,0382
0,1267	0,0769	60,6953
0,1643	0,1404	85,4526
0,1403	0,0581	41,4235
0,1636	0,0401	24,5354
0,2118	0,1204	56,8259
0,1413	0,0349	24,7161
0,4575	0,0614	13,4253
T = 85 °C		
$\bar{m}_{zn} (g)$	$\sigma$	CV (%)
0,0565	0,0417	73,7646
0,1713	0,0957	55,8570
0,1642	0,0855	52,0512
0,1479	0,0861	58,1862
0,1586	0,1026	64,7179
0,1936	0,0284	14,6495
0,0397	0,0176	44,3618
0,1765	0,1354	76,6856
0,2888	0,2814	97,4387

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se muestran los resultados y el análisis estadístico de las diferentes etapas del proceso de recuperación del zinc a partir de las pilas alcalinas usadas. Para lo cual se dispuso de un procedimiento para realizar el diseño del experimento; se procede al análisis de cada uno de los factores que influyen en la obtención óptima del zinc.

Las figuras 28, 29 y 30 representan el comportamiento de la masa del zinc recuperado por área de placa utilizada (electroanálisis) en función del tiempo, a diferentes condiciones de temperatura y concentración de electrolito trabajadas. El factor de agitación para el análisis del sistema se mantuvo constante a 220 rpm para todas las muestras; se observa en la figura 28 que la cantidad recuperada es mayor a condiciones de 0,5 M y 0,1 M del electrolito para los tiempos de 30 y 60 min respectivamente. Para un tiempo de 90 min se observa un comportamiento creciente en función del aumento de la concentración del electrolito a la temperatura trabajada.

Se observa en la figura 29 que la cantidad recuperada es mayor a condición de 0,9 M del electrolito para el tiempo de 90 min respectivamente. La menor cantidad de zinc se obtiene a 0,1 M; mientras que a 0,5 M el valor presenta mínima variación de la cantidad obtenida a las diferentes condiciones de trabajo. Para la concentración 0,1 M se observa un comportamiento creciente en función del aumento del tiempo a la temperatura trabajada.

Se observa en la figura 30 que la cantidad recuperada es mayor a condición de 0,9 M del electrolito para el tiempo de 90 min respectivamente. La menor cantidad de zinc se obtiene a 0,1 M a 30 min; mientras que a 0,5 M el valor presenta mínima variación de la cantidad obtenida a las diferentes condiciones de trabajo. Se observa que la mayor cantidad de zinc se obtiene a las condiciones de 0,9 M y 90 min a una temperatura de 40 °C, mientras que la menor cantidad se obtiene a las condiciones de 0,1 M y 90 min a una temperatura de 25 °C, con los valores  $228,7500 \pm 0,0614$  y  $18,7500 \pm 0,0257$   $g/m^2$  respectivamente.

En la tabla XIV puede observarse la prueba de Fischer que indica que no existe diferencia significativa en las masas obtenidas de zinc en función de los parámetros controlados, temperatura, concentración o la interacción entre ambas; esto se confirma al observar que el valor F calculado es menor al f crítico para un nivel de significancia del 5 %; por lo tanto la hipótesis nula es aceptada: no poseen una dependencia con la temperatura, concentración de trabajo o la interacción de los dos parámetros para los resultados obtenidos.

La tabla XV presenta la relación costo beneficio en función de la cantidad de zinc obtenida a condiciones óptimas de trabajo, se muestra el valor actual en el mercado del zinc en polvo como referencia en gramos Q 1 129,45 y el valor en función del zinc recuperado en el proceso Q 258,48; se obtiene un porcentaje de recuperación de 22,89 % respecto al valor que se encuentra disponible el material en el mercado.

La tabla XVI muestra la relación de la desviación de los datos de corridas repetitivas con el promedio de las mismas. Es una medida directa de la aleatoriedad de los datos por parte del experimentador o de los alrededores. Se observan errores mayores al 10 %, significa que la media o promedio no es valor representativo de los datos por lo que se debe mejorar el control de las condiciones del sistema para minimizar la aleatoriedad.



## CONCLUSIONES

1. Se evaluó el método hidrometalúrgico para la recuperación de zinc proveniente de pilas alcalinas, fijando los parámetros óptimos para el desarrollo del proceso.
2. No existe un efecto significativo en la cantidad de zinc recuperado al variar la temperatura en un rango de 10 °C – 90 °C.
3. No existe un efecto significativo en la cantidad de zinc recuperado al variar la concentración del electrolito en un rango de 0,1 - 0,9 M.
4. No existe un efecto significativo en la cantidad de zinc recuperado debido a la interacción de los parámetros de temperatura y concentración a las condiciones trabajadas.
5. Las condiciones óptimas del proceso para la obtención de zinc son 0,9 M, 90 min a una temperatura de 40 °C con valor de  $228,7500 \pm 0,0614 \text{ g/m}^2$ .
6. Se determinó una relación de costo beneficio de 22,89 % para el zinc obtenido respecto al valor actual en el mercado como polvo de zinc.



## RECOMENDACIONES

1. Mejorar el control de las condiciones del sistema para minimizar la aleatoriedad.
2. Verificar la calibración del equipo al inicio del proceso.
3. Trabajar el método con un rango más amplio de los factores de análisis para determinar posibles variaciones en los resultados obtenidos.
4. Utilizar un método instrumental de fluorescencia de rayos x para determinar la diferencia de espesor en la placa luego del electroanálisis.
5. No trabajar a temperaturas mayores a 90 °C debido a que por arriba de este valor se complicó el análisis por el daño causado a las placas por el electrolito.
6. Contar con cristalería más precisa para trabajar la curva de calibración para el análisis de concentración en AAS.



## BIBLIOGRAFÍA

1. DEVORE L. Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 7<sup>a</sup> ed. México: Cengage Learning, 2008. 710 p.
2. GAVIRIA, Ana; RESTREPO, Oscar. *Hidrometalurgia aplicada a línea de metales preciosos*. Trabajo de graduación licenciatura. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería química, 2007. 134 p.
3. LINDEN, David. *Handbook of batteries*. 3<sup>a</sup> ed. New York: McGraw Hill, 2004. 978 p.
4. METALES S.A.C. *Especificaciones técnicas polvo en zinc* [En línea]. <http://www.znmetal.com/el-polvo-de-zinc.php>. [Consulta: 22 de agosto de 2016].
5. OSWALDO, Edwin; ZENAYDA, Karen. *Propuesta de un método para la recuperación de zinc de pilas alcalinas usadas bajo el enfoque de producción más limpia*. Trabajo de graduación licenciatura. Universidad de El Salvador, Facultad de ingeniería química, 2009. 185 p.
6. QUIMICANET. *Catálogo del precio del zinc en polvo Guatemala* [En línea]. <http://www.quiminet.com/productos/zinc-metal-polvo-114312220464/precios.htm> [Consulta: 22 de agosto de 2016].

7. ROMAN ORTEGA, Francisco. *Introducción a la recuperación y reciclado de metales no férreos*. 3<sup>a</sup> ed. España: Instituto Tecnológico Geominero, 2008. 270 p.
8. SKOOG A, Douglas; HOLLER F, James; NIEMAN A, Timothy. *Principios del análisis instrumental*. 5<sup>a</sup> ed. España: McGraw-Hill, 2001. 997 p.
9. VELAZCO, Patricia; BONILLA, Pablo. *Recuperación y reutilización de los componentes químicos provenientes de pilas y/o baterías por vía húmeda*. Trabajo de graduación licenciatura. Universidad central del Ecuador. Facultad de Química, 2010. 210 p.
10. VOGEL I, Arthur. *Química analítica cuantitativa*. 2<sup>a</sup> ed. España: Kapelus. 1993. 748 p.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Ecuaciones utilizadas

- Ecuación 1: masa obtenida de zinc por método de electrodeposición

$$m_{zn} = m_{cf} - m_{co}$$

Ec. 1

Donde:

- $m_{zn}$  = masa zinc (g)
  - $m_{cf}$  = masa cátodo final (g)
  - $m_{co}$  = masa cátodo inicial (g)
- Ecuación 2: masa total de zinc por área de placa utilizada

$$m_{znT} = \frac{m_{zn}}{A_p}$$

Ec. 2

Donde:

- $m_{znT}$  = masa zinc total ( $g/m^2$ )
- $m_{zn}$  = masa zinc (g)
- $A_p$  = área de placa ( $m^2$ )

## Continuación de apéndice 1

- Ecuación 3: media muestral de una variable

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_i^n x_i}{N}$$

Ec. 3

Donde:

- $\bar{x}_i$  = media muestral de la variable  $x_i$
  - $x_i$  = variable de análisis
  - $N$  = número de datos
- Ecuación 4: desviación estándar de una muestra

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Ec. 4

Donde:

- $\sigma$  = desviación estándar
- $\bar{x}_i$  = media muestral de la variable  $x_i$
- $x_i$  = variable de análisis
- $N$  = número de datos

Continuación de apéndice 1

- Ecuación 5: coeficiente de variación de una muestra

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$$

Ec. 5

Donde:

- $CV$  = coeficiente de variación
  - $\sigma$  = desviación estándar
  - $\bar{x}_i$  = media muestral de la variable  $x_i$
- Ecuación 6: porcentaje de recuperación relación costo beneficio

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{(m_{znT})(\text{precio unitario})}{\text{precio actual del mercado}} * 100$$

Ec. 6

Donde:

- $m_{znT}$  = masa zinc total ( $g/m^2$ )
- Precio unitario = 1,13 Q
- Precio actual del mercado = 1 129,45 Q

Fuente: elaboración propia

Apéndice 2. **Datos obtenidos para el análisis, primera corrida**

N	$M_a$	$m_b$ (g)	$\Delta I$	$m_{cco}$ (g)	$\Delta I$	$m_{ccf}$ (g)	$\Delta I$	$HNO_3$ (ml)	$m_{am}$ (g)		$\Delta I$
1	Rayobac	24,0733	0,0001	47,5130	0,0001	52,0026	0,0001	10,0000	2,0000	2,0098	0,0001
2	Rayobac	23,6099	0,0001	78,8319	0,0001	83,5987	0,0001	10,0000	2,0000	22,0011	0,0001
3	Rayobac	23,6000	0,0001	40,6268	0,0001	44,6310	0,0001	10,0000	2,0000	2,0389	0,0001
4	E,Gold	23,3407	0,0001	39,1412	0,0001	42,5241	0,0001	10,0000	2,0000	2,0025	0,0001
5	GP	23,7011	0,0001	74,7557	0,0001	79,9531	0,0001	10,0000	2,0000	2,0177	0,0001
6	E,Gold	23,9813	0,0001	42,3797	0,0001	46,7728	0,0001	10,0000	2,0000	2,0193	0,0001
7	Rayobac	23,5845	0,0001	38,8430	0,0001	42,9552	0,0001	10,0000	2,0000	2,0247	0,0001
8	Duracell	24,1949	0,0001	33,9971	0,0001	38,5148	0,0001	10,0000	2,0000	2,0001	0,0001
9	E,Gold	23,5741	0,0001	51,5667	0,0001	55,7483	0,0001	10,0000	2,0000	2,0260	0,0001
10	E,Gold	24,1343	0,0001	47,5118	0,0001	51,1317	0,0001	10,0000	2,0000	2,0198	0,0001
11	Rayobac	23,4212	0,0001	38,9234	0,0001	43,2515	0,0001	10,0000	2,0000	2,0361	0,0001
12	E,Gold	23,9017	0,0001	33,9965	0,0001	38,3484	0,0001	10,0000	2,0000	2,0300	0,0001
13	Duracell	23,5331	0,0001	39,1400	0,0001	42,8127	0,0001	10,0000	2,0000	2,0417	0,0001
14	E,Gold	23,9322	0,0001	38,8424	0,0001	43,6990	0,0001	10,0000	2,0000	2,0333	0,0001
15	Rayobac	23,7707	0,0001	47,4712	0,0001	52,3210	0,0001	10,0000	2,0000	2,0524	0,0001
16	Duracell	23,1208	0,0001	51,5662	0,0001	56,3725	0,0001	10,0000	2,0000	2,0044	0,0001
17	E,Gold	23,9748	0,0001	42,3790	0,0001	44,7926	0,0001	10,0000	2,0000	2,0367	0,0001
18	Rayobac	23,6285	0,0001	54,7151	0,0001	59,4855	0,0001	10,0000	2,0000	2,0033	0,0001
19	Rayobac	23,8218	0,0001	39,3706	0,0001	43,4871	0,0001	10,0000	2,0000	1,9851	0,0001
20	Duracell	22,7572	0,0001	39,1398	0,0001	42,3138	0,0001	10,0000	2,0000	2,0020	0,0001
21	Rayobac	23,6829	0,0001	33,9957	0,0001	35,4942	0,0001	10,0000	2,0000	2,0321	0,0001
22	Sony	23,1397	0,0001	37,3322	0,0001	39,8890	0,0001	10,0000	2,0000	2,0177	0,0001
23	GP	23,9056	0,0001	51,5654	0,0001	55,4101	0,0001	10,0000	2,0000	2,1369	0,0001
24	Duracell	23,0833	0,0001	38,8414	0,0001	43,5042	0,0001	10,0000	2,0000	2,0872	0,0001
25	GP	23,7559	0,0001	32,5234	0,0001	37,2801	0,0001	10,0000	2,0000	2,0871	0,0001
26	E,Gold	23,8530	0,0001	42,3784	0,0001	46,6058	0,0001	10,0000	2,0000	2,0226	0,0001
27	E,Gold	23,9153	0,0001	24,9476	0,0001	27,3829	0,0001	10,0000	2,0000	2,0174	0,0001

Continuación del apéndice 2.

$m_{po}$ (g)	$\Delta I$	$m_{pf}$ (g)	$\Delta I$	$v$ (V)	$\Delta I$	$T$ (°C)	$\Delta I$
0,0093	0,0001	0,0544	0,0001	5,6100	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0407	0,0001	5,4700	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0729	0,0001	5,5400	3,0000	25,0000	3,0000
0,0093	0,0001	0,0591	0,0001	5,5500	3,0000	40,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0593	0,0001	5,5800	3,0000	40,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0804	0,0001	5,6300	3,0000	40,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0813	0,0001	5,6200	3,0000	85,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0810	0,0001	5,5500	3,0000	85,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0644	0,0001	5,6500	3,0000	85,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0909	0,0001	5,5700	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0515	0,0001	5,5600	3,0000	25,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,1163	0,0001	5,5800	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0903	0,0001	5,6500	3,0000	40,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0735	0,0001	5,6100	3,0000	40,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0610	0,0001	5,6000	3,0000	40,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0483	0,0001	5,6300	3,0000	85,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0647	0,0001	5,5800	3,0000	85,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0926	0,0001	5,6100	3,0000	85,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0675	0,0001	5,5500	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0470	0,0001	5,5900	3,0000	25,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0437	0,0001	5,6100	3,0000	25,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0576	0,0001	5,6000	3,0000	40,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0513	0,0001	5,5800	3,0000	40,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0767	0,0001	5,6500	3,0000	40,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,0617	0,0001	5,6000	3,0000	85,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0540	0,0001	5,6700	3,0000	85,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0525	0,0001	5,6200	3,0000	85,0000	3,0000

Continuación del apéndice 2.

$C_b (M)$	$t (min)$	$\Delta I$	$m_{co} (g)$	$\Delta I$	$m_{ao} (g)$	$\Delta I$	$m_{cf} (g)$	$\Delta I$	$m_{af} (g)$	$\Delta I$	$a (rpm)$	$A_p (m^2)$
0,1	30,0000	0,0500	46,2683	0,0001	12,9310	0,0001	46,5584	0,0001	12,8400	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	43,6165	0,0001	12,8071	0,0001	43,9777	0,0001	12,5131	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	43,8095	0,0001	12,4041	0,0001	43,9132	0,0001	12,2394	0,0001	220	0,0020
0,1	30,0000	0,0500	43,6013	0,0001	12,1504	0,0001	43,6206	0,0001	11,9452	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	43,5140	0,0001	11,8926	0,0001	43,8833	0,0001	11,4005	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	43,4178	0,0001	13,3950	0,0001	43,5411	0,0001	13,3346	0,0001	220	0,0020
0,1	30,0000	0,0500	43,2552	0,0001	13,2091	0,0001	43,2671	0,0001	12,9346	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	43,0449	0,0001	12,9093	0,0001	43,1074	0,0001	12,6384	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	42,8311	0,0001	12,6129	0,0001	42,8515	0,0001	12,3414	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	45,4971	0,0001	14,2675	0,0001	45,6410	0,0001	14,1431	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	41,3770	0,0001	14,1220	0,0001	41,4180	0,0001	13,8150	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	45,2390	0,0001	13,7844	0,0001	45,3059	0,0001	13,5616	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	45,1959	0,0001	13,5174	0,0001	45,3395	0,0001	13,2926	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	45,0961	0,0001	13,2570	0,0001	45,2090	0,0001	12,9900	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	45,0481	0,0001	12,9851	0,0001	45,1630	0,0001	12,5471	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	44,8509	0,0001	12,2454	0,0001	44,9516	0,0001	12,2165	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	44,0519	0,0001	12,2064	0,0001	44,3290	0,0001	11,9632	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	44,7025	0,0001	11,9560	0,0001	45,1168	0,0001	11,6900	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	44,4240	0,0001	11,6439	0,0001	44,5081	0,0001	11,1929	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	44,3330	0,0001	11,1790	0,0001	44,3510	0,0001	10,9321	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	44,1595	0,0001	10,9196	0,0001	44,2963	0,0001	10,5461	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	44,6152	0,0001	11,3019	0,0001	44,6671	0,0001	10,5600	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	43,4644	0,0001	10,5441	0,0001	43,5895	0,0001	10,0480	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	43,3131	0,0001	10,5135	0,0001	43,8371	0,0001	9,9300	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	43,1536	0,0001	9,9183	0,0001	43,2598	0,0001	9,2745	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	42,9345	0,0001	10,0166	0,0001	43,1124	0,0001	9,0668	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	43,9078	0,0001	12,5573	0,0001	44,1011	0,0001	12,1071	0,0001	220	0,0020

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Datos obtenidos para el análisis, segunda corrida

N	$M_a$	$m_b$ (g)	$\Delta I$	$m_{cco}$ (g)	$\Delta I$	$m_{ccf}$ (g)	$\Delta I$	$HNO_3$ (ml)	$m_{am}$ (g)		$\Delta I$
1	Duracell	24,2038	0,0001	25,7962	0,0001	28,5861	0,0001	10,0000	2,0000	2,0810	0,0001
2	Rayovac	23,5377	0,0001	52,4548	0,0001	55,1524	0,0001	10,0000	2,0000	2,0160	0,0001
3	Sony	17,5606	0,0001	82,5079	0,0001	86,4650	0,0001	10,0000	2,0000	2,0000	0,0001
4	Rayovac	23,3093	0,0001	66,1864	0,0001	69,9450	0,0001	10,0000	2,0000	2,0160	0,0001
5	Duracell	23,2026	0,0001	74,7448	0,0001	78,9120	0,0001	10,0000	2,0000	2,0610	0,0001
6	Rayovac	23,1110	0,0001	79,6784	0,0001	82,2516	0,0001	10,0000	2,0000	2,0000	0,0001
7	Rayovac	16,4258	0,0001	82,1965	0,0001	85,7731	0,0001	10,0000	2,0000	2,0017	0,0001
8	Sony	22,8734	0,0001	113,0211	0,0001	116,3561	0,0001	10,0000	2,0000	2,0020	0,0001
9	Duracell	23,7558	0,0001	88,7714	0,0001	91,7448	0,0001	10,0000	2,0000	2,0813	0,0001
10	Rayovac	22,8732	0,0001	18,5085	0,0001	20,7676	0,0001	10,0000	2,0000	2,1082	0,0001
11	Duracell	23,2647	0,0001	17,6969	0,0001	22,1979	0,0001	10,0000	2,0000	2,0140	0,0001
12	Energizer	23,7163	0,0001	18,6321	0,0001	21,7774	0,0001	10,0000	2,0000	2,0118	0,0001
13	E,Gold	23,8038	0,0001	19,2975	0,0001	23,4707	0,0001	10,0000	2,0000	2,0147	0,0001
14	GP Ultra	23,8062	0,0001	19,4001	0,0001	24,5730	0,0001	10,0000	2,0000	2,0413	0,0001
15	Maxell	23,6322	0,0001	20,7681	0,0001	24,5783	0,0001	10,0000	2,0000	2,0026	0,0001
16	Duracell	23,7446	0,0001	17,3423	0,0001	21,8885	0,0001	10,0000	2,0000	2,0948	0,0001
17	Duracell	24,0545	0,0001	19,9225	0,0001	24,9553	0,0001	10,0000	2,0000	2,0015	0,0001
18	GP Ultra	23,6717	0,0001	19,4611	0,0001	22,9083	0,0001	10,0000	2,0000	2,0086	0,0001
19	GP Ultra	23,7683	0,0001	42,3771	0,0001	46,4513	0,0001	10,0000	2,0000	2,0018	0,0001
20	Rayovac	23,4473	0,0001	32,0830	0,0001	36,7033	0,0001	10,0000	2,0000	2,0138	0,0001
21	E,Gold	24,0159	0,0001	35,8106	0,0001	40,1092	0,0001	10,0000	2,0000	2,0023	0,0001
22	Sony	22,9781	0,0001	41,1878	0,0001	45,6406	0,0001	10,0000	2,0000	2,0081	0,0001
23	GP Ultra	23,8059	0,0001	33,4980	0,0001	37,6919	0,0001	10,0000	2,0000	2,0036	0,0001
24	E,Gold	23,7287	0,0001	35,9001	0,0001	39,2292	0,0001	10,0000	2,0000	2,0430	0,0001
25	E,Gold	24,1151	0,0001	32,1597	0,0001	36,0582	0,0001	10,0000	2,0000	2,0214	0,0001
26	Sony	23,1213	0,0001	23,0608	0,0001	27,6120	0,0001	10,0000	2,0000	2,0114	0,0001
27	Energizer	23,7691	0,0001	24,6106	0,0001	29,8089	0,0001	10,0000	2,0000	2,0110	0,0001

Continuación del apéndice 3.

$m_{po}$ (g)	$\Delta I$	$m_{pf}$ (g)	$\Delta I$	$v$ (V)	$\Delta I$	$T$ ( $^{\circ}C$ )	$\Delta I$
0,0098	0,0001	0,0651	0,0001	5,6100	3,0000	25,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0628	0,0001	5,6000	3,0000	25,0000	3,0000
0,0093	0,0001	0,0524	0,0001	5,6500	3,0000	25,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,0600	0,0001	5,6300	3,0000	40,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0710	0,0001	5,6000	3,0000	40,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0759	0,0001	5,6200	3,0000	40,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0624	0,0001	5,6300	3,0000	85,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0743	0,0001	5,6200	3,0000	85,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0679	0,0001	5,6000	3,0000	85,0000	3,0000
0,0093	0,0001	0,0912	0,0001	5,5900	3,0000	25,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,0841	0,0001	5,6200	3,0000	25,0000	3,0000
0,0092	0,0001	0,0697	0,0001	5,5900	3,0000	25,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0652	0,0001	5,6100	3,0000	40,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0623	0,0001	5,6200	3,0000	40,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0752	0,0001	5,5800	3,0000	40,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,0973	0,0001	5,5800	3,0000	85,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0816	0,0001	5,6100	3,0000	85,0000	3,0000
0,0100	0,0001	0,0869	0,0001	5,5800	3,0000	85,0000	3,0000
0,0099	0,0001	0,0872	0,0001	5,5600	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0782	0,0001	5,6000	3,0000	25,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,1000	0,0001	5,6300	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0578	0,0001	5,6400	3,0000	40,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0881	0,0001	5,6000	3,0000	40,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,1299	0,0001	5,5900	3,0000	40,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0758	0,0001	5,5800	3,0000	85,0000	3,0000
0,0090	0,0001	0,0608	0,0001	5,6000	3,0000	85,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0529	0,0001	5,6500	3,0000	85,0000	3,0000

Continuación del apéndice 3.

$C_b (M)$	$t (min)$	$\Delta I$	$m_{co} (g)$	$\Delta I$	$m_{ao} (g)$	$\Delta I$	$m_{cf} (g)$	$\Delta I$	$m_{af} (g)$	$\Delta I$	$a (rpm)$	$A_p (m^2)$
0,1	30,0000	0,0500	41,4132	0,0001	12,6555	0,0001	41,8015	0,0001	12,4628	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	42,3601	0,0001	12,8001	0,0001	42,5851	0,0001	12,6120	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	41,7320	0,0001	12,4450	0,0001	41,7829	0,0001	12,2789	0,0001	220	0,0020
0,1	30,0000	0,0500	42,1739	0,0001	12,5962	0,0001	42,2026	0,0001	12,4411	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	41,5376	0,0001	12,2605	0,0001	41,7002	0,0001	12,0420	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	42,0744	0,0001	12,4392	0,0001	42,2377	0,0001	12,2680	0,0001	220	0,0020
0,1	30,0000	0,0500	41,8960	0,0001	12,2554	0,0001	41,9905	0,0001	12,1187	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	41,3543	0,0001	12,0312	0,0001	41,5009	0,0001	11,8774	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	41,6976	0,0001	12,1152	0,0001	41,7525	0,0001	12,1054	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	41,2009	0,0001	12,0956	0,0001	41,5278	0,0001	12,0940	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	40,6060	0,0001	11,8500	0,0001	40,6940	0,0001	11,6360	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	45,3411	0,0001	12,0914	0,0001	45,3573	0,0001	11,8347	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	40,2500	0,0001	11,6168	0,0001	40,3552	0,0001	11,3041	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	40,0801	0,0001	11,2939	0,0001	40,1810	0,0001	10,9381	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	45,0314	0,0001	11,8026	0,0001	45,2123	0,0001	11,4097	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	39,6790	0,0001	10,9266	0,0001	39,8120	0,0001	10,5217	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	44,6573	0,0001	11,4084	0,0001	44,7547	0,0001	11,0316	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	39,4975	0,0001	10,5114	0,0001	39,5361	0,0001	10,0838	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	39,2095	0,0001	10,0460	0,0001	39,2252	0,0001	9,8613	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	40,4425	0,0001	11,0070	0,0001	40,5389	0,0001	10,9932	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	40,2363	0,0001	10,9919	0,0001	40,3729	0,0001	10,8919	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	44,3251	0,0001	10,7719	0,0001	44,4477	0,0001	10,3265	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	40,1733	0,0001	10,9848	0,0001	40,3338	0,0001	10,6454	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	40,1904	0,0001	9,8025	0,0001	40,6360	0,0001	9,4714	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	44,0635	0,0001	12,7297	0,0001	44,1875	0,0001	12,2877	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	39,8021	0,0001	10,6359	0,0001	39,9786	0,0001	9,7100	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	45,1703	0,0001	12,5072	0,0001	45,2379	0,0001	12,0464	0,0001	220	0,0020

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 4. Datos obtenidos para el análisis, tercera corrida

N	$M_a$	$m_b$ (g)	$\Delta I$	$m_{cco}$ (g)	$\Delta I$	$m_{ccf}$ (g)	$\Delta I$	$HNO_3$ (ml)	$m_{am}$ (g)		$\Delta I$
1	GP Ultra	23,7683	0,0001	42,3771	0,0001	46,4513	0,0001	10,0000	2,0000	2,0117	0,0001
2	Rayobac	23,4473	0,0001	32,0830	0,0001	36,7033	0,0001	10,0000	2,0000	2,0000	0,0001
3	E,Gold	24,0159	0,0001	35,8106	0,0001	40,1092	0,0001	10,0000	2,0000	2,0345	0,0001
4	Sony	22,9781	0,0001	41,1878	0,0001	45,6406	0,0001	10,0000	2,0000	2,0211	0,0001
5	GP Ultra	23,8059	0,0001	33,4980	0,0001	37,6919	0,0001	10,0000	2,0000	2,0000	0,0001
6	E,Gold	23,7287	0,0001	35,9001	0,0001	39,2292	0,0001	10,0000	2,0000	2,0251	0,0001
7	E,Gold	24,1151	0,0001	32,1597	0,0001	36,0582	0,0001	10,0000	2,0000	2,1110	0,0001
8	Sony	23,1213	0,0001	23,0608	0,0001	27,6120	0,0001	10,0000	2,0000	2,0033	0,0001
9	Energizer	23,7691	0,0001	24,6106	0,0001	29,8089	0,0001	10,0000	2,0000	2,0000	0,0001
10	Duracell	23,4415	0,0001	33,9671	0,0001	35,0010	0,0001	10,0000	2,0000	2,0415	0,0001
11	Duracell	24,4249	0,0001	25,8381	0,0001	28,2456	0,0001	10,0000	2,0000	2,0117	0,0001
12	Duracell	24,4827	0,0001	22,5357	0,0001	26,5673	0,0001	10,0000	2,0000	2,0184	0,0001
13	Duracell	24,4163	0,0001	19,7780	0,0001	24,2942	0,0001	10,0000	2,0000	2,0388	0,0001
14	Duracell	24,4028	0,0001	21,4676	0,0001	22,7637	0,0001	10,0000	2,0000	2,0110	0,0001
15	Duracell	24,2764	0,0001	22,3460	0,0001	26,4875	0,0001	10,0000	2,0000	2,0039	0,0001
16	Duracell	23,1483	0,0001	20,1854	0,0001	24,6189	0,0001	10,0000	2,0000	2,0103	0,0001
17	Rayobac	23,9570	0,0001	20,0776	0,0001	24,8885	0,0001	10,0000	2,0000	2,0102	0,0001
18	Rayobac	23,7712	0,0001	30,6483	0,0001	35,1437	0,0001	10,0000	2,0000	2,0521	0,0001
19	E,Gold	23,4134	0,0001	52,1054	0,0001	55,0000	0,0001	10,0000	2,0000	2,0823	0,0001
20	Rayobac	24,0127	0,0001	50,9667	0,0001	55,5483	0,0001	10,0000	2,0000	2,0086	0,0001
21	Duracell	23,5312	0,0001	39,1398	0,0001	42,1145	0,0001	10,0000	2,0000	2,0410	0,0001
22	GP Ultra	23,2210	0,0001	33,9957	0,0001	36,5010	0,0001	10,0000	2,0000	2,0092	0,0001
23	E,Gold	24,1011	0,0001	18,6321	0,0001	21,3433	0,0001	10,0000	2,0000	2,0068	0,0001
24	Rayobac	23,8745	0,0001	19,2975	0,0001	23,0124	0,0001	10,0000	2,0000	2,1245	0,0001
25	E,Gold	22,9823	0,0001	19,4001	0,0001	22,4110	0,0001	10,0000	2,0000	2,0869	0,0001
26	Duracell	23,7744	0,0001	20,7681	0,0001	23,4441	0,0001	10,0000	2,0000	2,0370	0,0001
27	Sony	23,3379	0,0001	47,3118	0,0001	50,1017	0,0001	10,0000	2,0000	2,0251	0,0001

Continuación del apéndice 4.

$m_{po}$ (g)	$\Delta I$	$m_{pf}$ (g)	$\Delta I$	$v$ (V)	$\Delta I$	$T$ (°C)	$\Delta I$
0,0093	0,0001	0,0551	0,0001	5,6400	3,0000	25,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0738	0,0001	5,6200	3,0000	25,0000	3,0000
0,0093	0,0001	0,0634	0,0001	5,6300	3,0000	25,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0540	0,0001	5,6000	3,0000	40,0000	3,0000
0,0130	0,0001	0,0532	0,0001	5,6100	3,0000	40,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0759	0,0001	5,5800	3,0000	40,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0615	0,0001	5,6000	3,0000	85,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0728	0,0001	5,5900	3,0000	85,0000	3,0000
0,0099	0,0001	0,0673	0,0001	5,6000	3,0000	85,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,0710	0,0001	5,6300	3,0000	25,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0811	0,0001	5,5800	3,0000	25,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0573	0,0001	5,6100	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0622	0,0001	5,6200	3,0000	40,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0910	0,0001	5,6000	3,0000	40,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0675	0,0001	5,6400	3,0000	40,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0451	0,0001	5,5700	3,0000	85,0000	3,0000
0,0093	0,0001	0,0536	0,0001	5,6300	3,0000	85,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0546	0,0001	5,6500	3,0000	85,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0613	0,0001	5,5900	3,0000	25,0000	3,0000
0,0097	0,0001	0,0867	0,0001	5,6100	3,0000	25,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0617	0,0001	5,6000	3,0000	25,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,1130	0,0001	5,6000	3,0000	40,0000	3,0000
0,0094	0,0001	0,0727	0,0001	5,6200	3,0000	40,0000	3,0000
0,0099	0,0001	0,0656	0,0001	5,5800	3,0000	40,0000	3,0000
0,0098	0,0001	0,0707	0,0001	5,6100	3,0000	85,0000	3,0000
0,0095	0,0001	0,0529	0,0001	5,6000	3,0000	85,0000	3,0000
0,0096	0,0001	0,0564	0,0001	5,6300	3,0000	85,0000	3,0000

Continuación del apéndice 4.

$C_b (M)$	$t (min)$	$\Delta I$	$m_{co} (g)$	$\Delta I$	$m_{ao} (g)$	$\Delta I$	$m_{cf} (g)$	$\Delta I$	$m_{af} (g)$	$\Delta I$	$a (rpm)$	$A_p (m^2)$
0,1	30,0000	0,0500	39,4238	0,0001	12,5072	0,0001	39,5355	0,0001	12,0464	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	43,7915	0,0001	12,2784	0,0001	44,0575	0,0001	12,1371	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	39,1027	0,0001	12,0333	0,0001	39,2899	0,0001	11,9073	0,0001	220	0,0020
0,1	30,0000	0,0500	43,5845	0,0001	12,1277	0,0001	43,6549	0,0001	12,0171	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	39,1388	0,0001	11,9001	0,0001	39,4299	0,0001	11,7050	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	43,5483	0,0001	11,9927	0,0001	43,8972	0,0001	11,8085	0,0001	220	0,0020
0,1	30,0000	0,0500	38,9428	0,0001	11,6960	0,0001	39,0060	0,0001	11,5038	0,0001	220	0,0020
0,5	30,0000	0,0500	43,3686	0,0001	11,8038	0,0001	43,6032	0,0001	11,5669	0,0001	220	0,0020
0,9	30,0000	0,0500	38,8210	0,0001	11,4964	0,0001	38,8648	0,0001	11,2982	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	38,2807	0,0001	11,5583	0,0001	38,6407	0,0001	11,3053	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	42,9850	0,0001	11,2807	0,0001	43,1000	0,0001	10,9694	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	37,9968	0,0001	11,2987	0,0001	38,1000	0,0001	10,9752	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	42,5617	0,0001	10,9597	0,0001	42,6737	0,0001	10,5244	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	37,3406	0,0001	10,9662	0,0001	37,5476	0,0001	10,5742	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	42,5335	0,0001	10,5085	0,0001	42,6616	0,0001	9,9347	0,0001	220	0,0020
0,1	60,0000	0,0500	36,7943	0,0001	10,5702	0,0001	37,0745	0,0001	10,2249	0,0001	220	0,0020
0,5	60,0000	0,0500	42,3589	0,0001	9,9324	0,0001	42,4602	0,0001	9,5204	0,0001	220	0,0020
0,9	60,0000	0,0500	36,5966	0,0001	10,2155	0,0001	36,6732	0,0001	9,7626	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	43,1988	0,0001	9,5150	0,0001	43,2115	0,0001	8,9978	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	39,0788	0,0001	9,4812	0,0001	39,2218	0,0001	9,3711	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	42,3589	0,0001	9,9622	0,0001	42,5466	0,0001	9,6133	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	41,0511	0,0001	9,2218	0,0001	41,2566	0,0001	9,0314	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	43,2366	0,0001	9,4102	0,0001	43,4418	0,0001	9,2002	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	42,5512	0,0001	8,8033	0,0001	42,9541	0,0001	8,5466	0,0001	220	0,0020
0,1	90,0000	0,0500	41,1322	0,0001	9,0254	0,0001	41,3945	0,0001	8,8341	0,0001	220	0,0020
0,5	90,0000	0,0500	43,1014	0,0001	8,4565	0,0001	43,3277	0,0001	8,3305	0,0001	220	0,0020
0,9	90,0000	0,0500	40,5522	0,0001	8,6444	0,0001	41,1578	0,0001	8,3577	0,0001	220	0,0020

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Datos calculados para elaboración de resultados 1**

		T = 25 °C									
		$m_{co} (g)$			$m_{cf} (g)$			$m_{zn} (g)$			
$C_b (M)$	$t (min)$	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	$\bar{m}_{zn} (g)$
0,1	30	46,2683	41,4132	39,4238	46,5584	41,8015	39,5355	0,2901	0,3883	0,1117	0,2634
0,1	60	45,4971	41,2009	38,2807	45,6410	41,5278	38,6407	0,1439	0,3269	0,3600	0,2769
0,1	90	44,4440	39,1895	43,1988	44,5081	39,2252	43,2115	0,0641	0,0357	0,0127	0,0375
0,5	30	43,6165	42,3601	43,7915	43,9777	42,5851	44,0575	0,3612	0,2250	0,2660	0,2841
0,5	60	41,3770	40,6060	42,9850	41,4180	40,6940	43,1000	0,0410	0,0880	0,1150	0,0813
0,5	90	44,3330	40,4425	39,0788	44,3510	40,5389	39,2218	0,0180	0,0964	0,1430	0,0858
0,9	30	43,8095	41,7320	39,1027	43,9132	41,7829	39,2899	0,1037	0,0509	0,1872	0,1139
0,9	60	45,2390	45,3411	37,9968	45,3059	45,3573	38,1000	0,0669	0,0162	0,1032	0,0621
0,9	90	44,1595	40,2363	42,3589	44,2963	40,3729	42,5466	0,1368	0,1366	0,1877	0,1537

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Datos calculados para elaboración de resultados 2**

		T = 40 °C									
		$m_{co} (g)$			$m_{cf} (g)$			$m_{zn} (g)$			
$C_b (M)$	$t (min)$	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	$\bar{m}_{zn} (g)$
0,1	30	43,6013	42,1739	43,5845	43,6206	42,2026	43,6549	0,0193	0,0287	0,0704	0,0395
0,1	60	45,1959	40,2500	42,5617	45,3395	40,3552	42,6737	0,1436	0,1052	0,1120	0,1203
0,1	90	44,6152	44,3251	41,0511	44,6671	44,4477	41,2566	0,0519	0,1226	0,2055	0,1267
0,5	30	43,5140	41,5376	39,1388	43,8033	41,5500	39,3299	0,2893	0,0124	0,1911	0,1643
0,5	60	45,0961	40,0801	37,3406	45,2090	40,1810	37,5476	0,1129	0,1009	0,2070	0,1403
0,5	90	43,4644	40,1733	43,2366	43,5895	40,3338	43,4418	0,1251	0,1605	0,2052	0,1636
0,9	30	43,4178	42,0744	43,5483	43,5411	42,2377	43,8972	0,1233	0,1633	0,3489	0,2118
0,9	60	45,0481	45,0314	42,5335	45,1630	45,2123	42,6616	0,1149	0,1809	0,1281	0,1413
0,9	90	43,3131	40,1904	42,5512	43,8371	40,6360	42,9541	0,5240	0,4456	0,4029	0,4575

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Datos calculados para elaboración de resultados 3**

		T = 85 °C									
		$m_{co} (g)$			$m_{cf} (g)$			$m_{zn} (g)$			
$C_b (M)$	$t (min)$	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	$\bar{m}_{zn} (g)$
0,1	30	43,2552	41,8960	38,9428	43,2671	41,9905	39,0060	0,0119	0,0945	0,0632	0,0565
0,1	60	44,8509	39,6790	36,7943	44,9516	39,8120	37,0745	0,1007	0,1330	0,2802	0,1713
0,1	90	43,1536	44,0635	41,1322	43,2598	44,1875	41,3945	0,1062	0,1240	0,2623	0,1642
0,5	30	43,0449	41,3543	43,3686	43,1074	41,5009	43,6032	0,0625	0,1466	0,2346	0,1479
0,5	60	44,0519	44,6573	42,3589	44,3290	44,7547	42,4602	0,2771	0,0974	0,1013	0,1586
0,5	90	42,9345	39,8021	43,1014	43,1124	39,9786	43,3277	0,1779	0,1765	0,2263	0,1936
0,9	30	42,8311	41,6976	38,8210	42,8515	41,7525	38,8648	0,0204	0,0549	0,0438	0,0397
0,9	60	44,7925	39,4775	36,5266	45,1168	39,5361	36,6732	0,3243	0,0586	0,1466	0,1765
0,9	90	43,9078	45,1703	40,5522	44,1011	45,2379	41,1578	0,1933	0,0676	0,6056	0,2888

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Datos calculados para elaboración de resultados 4**

		T = 25 °C									
		$m_{ao} (g)$			$m_{af} (g)$			$m_{al} (g)$			
$C_b (M)$	$t (min)$	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	$\bar{m}_{al} (g)$
0,1	30	12,9310	12,6555	12,5072	12,8400	12,4628	12,0464	0,0910	0,1927	0,4608	0,2482
0,1	60	14,2675	12,0956	11,5583	14,1431	12,0940	11,3053	0,1244	0,0016	0,2530	0,1263
0,1	90	11,6439	10,0460	9,5150	11,1929	9,8613	8,9978	0,4510	0,1847	0,5172	0,3843
0,5	30	12,8071	12,8001	12,2784	12,5131	12,6120	12,1371	0,2940	0,1881	0,1413	0,2078
0,5	60	14,1220	11,8500	11,2807	13,8150	11,6360	10,9694	0,3070	0,2140	0,3113	0,2774
0,5	90	11,1790	11,0070	9,4812	10,9321	10,9932	9,3711	0,2469	0,0138	0,1101	0,1236
0,9	30	12,4041	12,4450	12,0333	12,2394	12,2789	11,9073	0,1647	0,1661	0,1260	0,1523
0,9	60	13,7844	12,0914	11,2987	13,5616	11,8347	10,9752	0,2228	0,2567	0,3235	0,2677
0,9	90	10,9196	10,9919	9,9622	10,5461	10,8919	9,6133	0,3735	0,1000	0,3489	0,2741

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Datos calculados para elaboración de resultados 5**

T = 40°C											
		$m_{ao} (g)$			$m_{af} (g)$			$m_{al} (g)$			
$C_b (M)$	$t (min)$	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	$\bar{m}_{al} (g)$
0,1	30	12,1504	12,5962	12,1277	11,9452	12,4411	12,0171	0,2052	0,1551	0,1106	0,1570
0,1	60	13,5174	11,6168	10,9597	13,2926	11,3041	10,5244	0,2248	0,3127	0,4353	0,3243
0,1	90	11,3019	10,7719	9,2218	10,5600	10,3265	9,0314	0,7419	0,4454	0,1904	0,4592
0,5	30	11,8926	12,2605	11,9001	11,4005	12,0420	11,7050	0,4921	0,2185	0,1951	0,3019
0,5	60	13,2570	11,2939	10,9662	12,9900	10,9381	10,5742	0,2670	0,3558	0,3920	0,3383
0,5	90	10,5441	10,9848	9,4102	10,0480	10,6454	9,2002	0,4961	0,3394	0,2100	0,3485
0,9	30	13,3950	12,4392	11,9927	13,3346	12,2680	11,8085	0,0604	0,1712	0,1842	0,1386
0,9	60	12,9851	11,8026	10,5085	12,5471	11,4097	9,9347	0,4380	0,3929	0,5738	0,4682
0,9	90	10,5135	9,8025	8,8033	9,9300	9,4714	8,5466	0,5835	0,3311	0,2567	0,3904

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Datos calculados para elaboración de resultados 6**

T = 85°C											
		$m_{ao} (g)$			$m_{af} (g)$			$m_{al} (g)$			
$C_b (M)$	$t (min)$	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	c 1	c 2	c 3	$\bar{m}_{al} (g)$
0,1	30	13,2091	12,2554	11,6960	12,9346	12,1187	11,5038	0,2745	0,1367	0,1922	0,2011
0,1	60	12,2454	10,9266	10,5702	12,2165	10,5217	10,2249	0,0289	0,4049	0,3453	0,2597
0,1	90	9,9183	12,7297	9,0254	9,2745	12,2877	8,8341	0,6438	0,4420	0,1913	0,4257
0,5	30	12,9093	12,0312	11,8038	12,6384	11,8774	11,5669	0,2709	0,1538	0,2369	0,2205
0,5	60	12,2064	11,4084	9,9324	11,9632	11,0316	9,5204	0,2432	0,3768	0,4120	0,3440
0,5	90	10,0166	10,6359	8,4565	9,0668	9,7100	8,3305	0,9498	0,9259	0,1260	0,6672
0,9	30	12,6129	12,1152	12,1152	12,3414	12,1054	12,1054	0,2715	0,0098	0,0098	0,0970
0,9	60	11,9560	10,5114	10,5114	11,6900	10,0838	10,0838	0,2660	0,4276	0,4276	0,3737
0,9	90	12,5573	12,5072	12,5072	12,1071	12,0464	12,0464	0,4502	0,4608	0,4608	0,4573

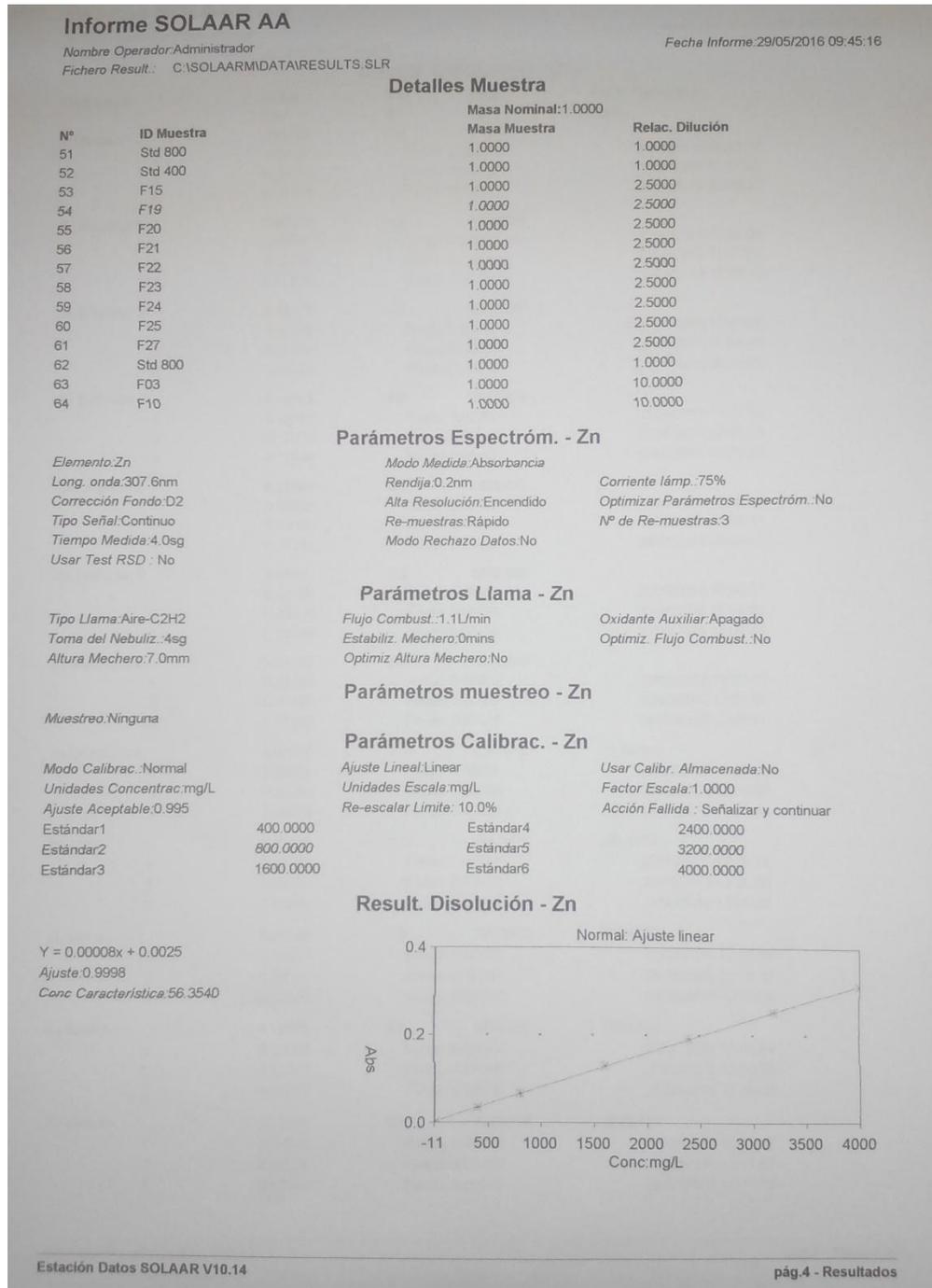
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Resultado de muestreo a 25 °C, 40 °C y 85 °C**

T = 25 °C				
$C_b$ (M)	$t$ (min)	$\bar{m}_{zn}$ (g)	$A_p$ (m <sup>2</sup> )	$m_{znT}$ (g/m <sup>2</sup> )
0,1000	30,0000	0,2634	0,0020	131,6833
0,1000	60,0000	0,2769	0,0020	138,4667
0,1000	90,0000	0,0375	0,0020	18,7500
0,5000	30,0000	0,2841	0,0020	142,0333
0,5000	60,0000	0,0813	0,0020	40,6667
0,5000	90,0000	0,0858	0,0020	42,9000
0,9000	30,0000	0,1139	0,0020	56,9667
0,9000	60,0000	0,0621	0,0020	31,0500
0,9000	90,0000	0,1537	0,0020	76,8500
T = 40 °C				
$C_b$ (M)	$t$ (min)	$\bar{m}_{zn}$ (g)	$A_p$ (m <sup>2</sup> )	$m_{znT}$ (g/m <sup>2</sup> )
0,1000	30,0000	0,0395	0,0020	19,7333
0,1000	60,0000	0,1203	0,0020	60,1333
0,1000	90,0000	0,1267	0,0020	63,3333
0,5000	30,0000	0,1643	0,0020	82,1367
0,5000	60,0000	0,1403	0,0020	70,1333
0,5000	90,0000	0,1636	0,0020	81,8000
0,9000	30,0000	0,2118	0,0020	105,9167
0,9000	60,0000	0,1413	0,0020	70,6500
0,9000	90,0000	0,4575	0,0020	228,7500
T = 85 °C				
$C_b$ (M)	$t$ (min)	$\bar{m}_{zn}$ (g)	$A_p$ (m <sup>2</sup> )	$m_{znT}$ (g/m <sup>2</sup> )
0,1000	30,0000	0,0565	0,0020	28,2667
0,1000	60,0000	0,1713	0,0020	85,6500
0,1000	90,0000	0,1642	0,0020	82,0833
0,5000	30,0000	0,1479	0,0020	73,9500
0,5000	60,0000	0,1586	0,0020	79,3000
0,5000	90,0000	0,1936	0,0020	96,7833
0,9000	30,0000	0,0397	0,0020	19,8500
0,9000	60,0000	0,1765	0,0020	88,2500
0,9000	90,0000	0,2888	0,0020	144,4167

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 12. Determinación de concentración de Zn por AAS



Continuación del apéndice 12.

Informe SOLAAR AA					Fecha Informe: 29/05/2016 09:45:16
Nombre Operador: Administrador					
Fichero Result.: C:\SOLAAR\MIDATA\RESULTS.SLR					
Result. Disolución - Zn					
ID Muestra	Señal	Rsd	Conc.	Conc. Corregida	
	Abs	%	mg/L	mg/L	
Zn Blanco	0.00160	7.4	0.0000		
1	0.00151	Fondo: 0.00227		25/05/2016 12:03:27	
2	0.00156	Fondo: 0.00225		25/05/2016 12:03:33	
3	0.00174	Fondo: 0.00226		25/05/2016 12:03:37	
Zn Estándar 1	0.03271	0.6	400.0000		
1	0.03250	Fondo: 0.00300		25/05/2016 12:04:04	
2	0.03273	Fondo: 0.00264		25/05/2016 12:04:08	
3	0.03292	Fondo: 0.00243		25/05/2016 12:04:12	
Zn Estándar 2	0.06473	0.0	800.0000		
1	0.06470	Fondo: 0.00317		25/05/2016 12:04:38	
2	0.06476	Fondo: 0.00354		25/05/2016 12:04:43	
3	0.06473	Fondo: 0.00312		25/05/2016 12:04:47	
Zn Estándar 3	0.12883	0.3	1600.0000		
1	0.12871	Fondo: 0.00383		25/05/2016 12:05:16	
2	0.12930	Fondo: 0.00346		25/05/2016 12:05:20	
3	0.12848	Fondo: 0.00351		25/05/2016 12:05:25	
Zn Estándar 4	0.19204	0.2	2400.0000		
1	0.19230	Fondo: 0.00442		25/05/2016 12:05:53	
2	0.19225	Fondo: 0.00389		25/05/2016 12:05:57	
3	0.19157	Fondo: 0.00422		25/05/2016 12:06:02	
Zn Estándar 5	0.25327	0.2	3200.0000		
1	0.25389	Fondo: 0.00507		25/05/2016 12:06:27	
2	0.25296	Fondo: 0.00497		25/05/2016 12:06:32	
3	0.25296	Fondo: 0.00496		25/05/2016 12:06:37	
Zn Estándar 6	0.31228	0.3	4000.0000		
1	0.31185	Fondo: 0.00509		25/05/2016 12:07:02	
2	0.31186	Fondo: 0.00557		25/05/2016 12:07:07	
3	0.31333	Fondo: 0.00523		25/05/2016 12:07:11	
Zn BLANCO H	0.00046	37.0	-25.7978 C	-25.7978 C	
1	0.00027	Fondo: 0.00261		25/05/2016 12:08:35	
2	0.00061	Fondo: 0.00228		25/05/2016 12:08:39	
3	0.00049	Fondo: 0.00228		25/05/2016 12:08:44	
Zn 400 H	0.03250	1.0	384.6475	384.6475	
1	0.03233	Fondo: 0.00301		25/05/2016 12:09:16	
2	0.03229	Fondo: 0.00312		25/05/2016 12:09:20	
3	0.03289	Fondo: 0.00246		25/05/2016 12:09:25	
Zn 800 H	0.06342	0.6	780.6602	780.6602	
1	0.06307	Fondo: 0.00320		25/05/2016 12:09:55	
2	0.06341	Fondo: 0.00297		25/05/2016 12:10:00	
3	0.06379	Fondo: 0.00284		25/05/2016 12:10:04	
Zn 1600 H	0.12009	0.5	1506.375	1506.375	
1	0.12008	Fondo: 0.00412		25/05/2016 12:10:34	
2	0.11947	Fondo: 0.00385		25/05/2016 12:10:39	
3	0.12071	Fondo: 0.00376		25/05/2016 12:10:43	
Zn 2400 H	0.17571	0.1	2218.776	2218.776	
1	0.17594	Fondo: 0.00455		25/05/2016 12:11:17	
2	0.17556	Fondo: 0.00437		25/05/2016 12:11:22	
3	0.17562	Fondo: 0.00435		25/05/2016 12:11:26	

Continuación del apéndice 12.

<b>Informe SOLAAR AA</b>				
Nombre Operador: Administrador			Fecha Informe 29/05/2016 09:45:16	
Fichero Result.: C:\SOLAAR\MIDATA\RESULTS.SLR				
<b>Result. Disolución - Zn</b>				
ID Muestra	Señal	Rsd	Conc.	Conc. Corregida
	Abs	%	mg/L	mg/L
Zn 3200 H	<b>0.22501</b>	<b>0.6</b>	<b>2850.160</b>	<b>2850.160</b>
	0.22382	Fondo: 0.00508		25/05/2016 12:11:56
	0.22488	Fondo: 0.00486		25/05/2016 12:12:00
	0.22631	Fondo: 0.00499		25/05/2016 12:12:04
Zn 4000 H	<b>0.26790</b>	<b>0.3</b>	<b>3399.563</b>	<b>3399.563</b>
	0.26717	Fondo: 0.00522		25/05/2016 12:12:34
	0.26857	Fondo: 0.00526		25/05/2016 12:12:38
	0.26797	Fondo: 0.00532		25/05/2016 12:12:43
Zn I1	<b>0.38169</b>	<b>0.4</b>	<b>4827.227-C</b>	<b>4827.227-C</b>
	0.38253	Fondo: 0.00715		25/05/2016 12:14:48
	0.38432	Fondo: 0.00708		25/05/2016 12:14:53
	0.38532	Fondo: 0.00733		25/05/2016 12:14:57
Zn I1*	<b>0.18343</b>	<b>0.6</b>	<b>2317.686</b>	<b>5794.214</b>
	0.18234	Fondo: 0.00317		25/05/2016 12:48:24
	0.18452	Fondo: 0.00267		25/05/2016 12:48:28
	0.18343	Fondo: 0.00245		25/05/2016 12:48:33
Zn I2*	<b>0.10494</b>	<b>0.5</b>	<b>1312.386</b>	<b>3280.964</b>
	0.10559	Fondo: 0.00444		25/05/2016 12:49:01
	0.10455	Fondo: 0.00491		25/05/2016 12:49:05
	0.10468	Fondo: 0.00495		25/05/2016 12:49:10
Zn I3*	<b>0.09475</b>	<b>0.2</b>	<b>1181.934</b>	<b>2954.836</b>
	0.09451	Fondo: 0.00676		25/05/2016 12:49:40
	0.09490	Fondo: 0.00681		25/05/2016 12:49:44
	0.09486	Fondo: 0.00621		25/05/2016 12:49:49
Zn I4*	<b>0.19012</b>	<b>0.1</b>	<b>2403.397</b>	<b>6008.493</b>
	0.19017	Fondo: 0.00297		25/05/2016 12:50:21
	0.19032	Fondo: 0.00284		25/05/2016 12:50:26
	0.18988	Fondo: 0.00241		25/05/2016 12:50:30
Zn I5*	<b>0.10304</b>	<b>0.5</b>	<b>1288.045</b>	<b>3220.112</b>
	0.10352	Fondo: 0.00433		25/05/2016 12:50:59
	0.10259	Fondo: 0.00466		25/05/2016 12:51:04
	0.10301	Fondo: 0.00444		25/05/2016 12:51:08
Zn I6*	<b>0.09748</b>	<b>0.3</b>	<b>1216.798</b>	<b>3041.995</b>
	0.09755	Fondo: 0.00515		25/05/2016 12:51:35
	0.09718	Fondo: 0.00576		25/05/2016 12:51:39
	0.09770	Fondo: 0.00548		25/05/2016 12:51:44
Zn I7*	<b>0.19612</b>	<b>0.6</b>	<b>2480.154</b>	<b>6200.385</b>
	0.19739	Fondo: 0.00165		25/05/2016 12:52:12
	0.19586	Fondo: 0.00203		25/05/2016 12:52:17
	0.19511	Fondo: 0.00240		25/05/2016 12:52:21
Zn I8*	<b>0.12367</b>	<b>0.7</b>	<b>1552.343</b>	<b>3880.857</b>
	0.12437	Fondo: 0.00368		25/05/2016 12:52:50
	0.12391	Fondo: 0.00393		25/05/2016 12:52:54
	0.12275	Fondo: 0.00391		25/05/2016 12:52:59
Zn I9*	<b>0.09604</b>	<b>1.1</b>	<b>1198.418</b>	<b>2996.044</b>
	0.09510	Fondo: 0.00481		25/05/2016 12:53:34
	0.09592	Fondo: 0.00445		25/05/2016 12:53:38
	0.09711	Fondo: 0.00434		25/05/2016 12:53:43

Continuación del apéndice 12.

Informe SOLAAR AA					Fecha Informe: 29/05/2016 09:45:16
Nombre Operador: Administrador					
Fichero Result.: C:\SOLAAR\MIDATA\RESULTS.SLR					
Result. Disolución - Zn					
ID Muestra	Señal	Rsd	Conc.	Conc. Corregida	
	Abs	%	mg/L	mg/L	
Zn Blanco	0.00160	7.4	0.0000		
1	0.00151	Fondo: 0.00227		25/05/2016 12:03:27	
2	0.00156	Fondo: 0.00225		25/05/2016 12:03:33	
3	0.00174	Fondo: 0.00226		25/05/2016 12:03:37	
Zn Estándar 1	0.03271	0.6	400.0000		
1	0.03250	Fondo: 0.00300		25/05/2016 12:04:04	
2	0.03273	Fondo: 0.00264		25/05/2016 12:04:08	
3	0.03292	Fondo: 0.00243		25/05/2016 12:04:12	
Zn Estándar 2	0.06473	0.0	800.0000		
1	0.06470	Fondo: 0.00317		25/05/2016 12:04:38	
2	0.06476	Fondo: 0.00354		25/05/2016 12:04:43	
3	0.06473	Fondo: 0.00312		25/05/2016 12:04:47	
Zn Estándar 3	0.12883	0.3	1600.0000		
1	0.12871	Fondo: 0.00383		25/05/2016 12:05:16	
2	0.12930	Fondo: 0.00346		25/05/2016 12:05:20	
3	0.12848	Fondo: 0.00351		25/05/2016 12:05:25	
Zn Estándar 4	0.19204	0.2	2400.0000		
1	0.19230	Fondo: 0.00442		25/05/2016 12:05:53	
2	0.19225	Fondo: 0.00389		25/05/2016 12:05:57	
3	0.19157	Fondo: 0.00422		25/05/2016 12:06:02	
Zn Estándar 5	0.25327	0.2	3200.0000		
1	0.25389	Fondo: 0.00507		25/05/2016 12:06:27	
2	0.25296	Fondo: 0.00497		25/05/2016 12:06:32	
3	0.25296	Fondo: 0.00496		25/05/2016 12:06:37	
Zn Estándar 6	0.31228	0.3	4000.0000		
1	0.31185	Fondo: 0.00509		25/05/2016 12:07:02	
2	0.31186	Fondo: 0.00557		25/05/2016 12:07:07	
3	0.31333	Fondo: 0.00523		25/05/2016 12:07:11	
Zn BLANCO H	0.00046	37.0	-25.7978 C	-25.7978 C	
1	0.00027	Fondo: 0.00261		25/05/2016 12:08:35	
2	0.00061	Fondo: 0.00228		25/05/2016 12:08:39	
3	0.00049	Fondo: 0.00228		25/05/2016 12:08:44	
Zn 400 H	0.03250	1.0	384.6475	384.6475	
1	0.03233	Fondo: 0.00301		25/05/2016 12:09:16	
2	0.03229	Fondo: 0.00312		25/05/2016 12:09:20	
3	0.03289	Fondo: 0.00246		25/05/2016 12:09:25	
Zn 800 H	0.06342	0.6	780.6602	780.6602	
1	0.06307	Fondo: 0.00320		25/05/2016 12:09:55	
2	0.06341	Fondo: 0.00297		25/05/2016 12:10:00	
3	0.06379	Fondo: 0.00284		25/05/2016 12:10:04	
Zn 1600 H	0.12009	0.5	1506.375	1506.375	
1	0.12008	Fondo: 0.00412		25/05/2016 12:10:34	
2	0.11947	Fondo: 0.00385		25/05/2016 12:10:39	
3	0.12071	Fondo: 0.00376		25/05/2016 12:10:43	
Zn 2400 H	0.17571	0.1	2218.776	2218.776	
1	0.17594	Fondo: 0.00455		25/05/2016 12:11:17	
2	0.17556	Fondo: 0.00437		25/05/2016 12:11:22	
3	0.17562	Fondo: 0.00435		25/05/2016 12:11:26	

Continuación del apéndice 12.

<b>Informe SOLAAR AA</b>				
<i>Nombre Operador:</i> Administrador			<i>Fecha Informe:</i> 29/05/2016 09:45:16	
<i>Fichero Result.:</i> C:\SOLAAR\MIDATA\RESULTS.SLR				
<b>Result. Disolución - Zn</b>				
<b>ID Muestra</b>	<b>Señal</b>	<b>Rsd</b>	<b>Conc.</b>	<b>Conc. Corregida</b>
	Abs	%	mg/L	mg/L
<b>Zn I22*</b>	<b>0.18051</b>	<b>1.5</b>	<b>2280.222</b>	<b>5700.556</b>
1	0.18355	Fondo: -0.00027		25/05/2016 01:02:07
2	0.17920	Fondo: -0.00092		25/05/2016 01:02:12
3	0.17878	Fondo: -0.00046		25/05/2016 01:02:16
<b>Zn I23*</b>	<b>0.11454</b>	<b>0.7</b>	<b>1435.349</b>	<b>3588.372</b>
1	0.11540	Fondo: -0.00048		25/05/2016 01:02:44
2	0.11386	Fondo: -0.00038		25/05/2016 01:02:48
3	0.11436	Fondo: -0.00065		25/05/2016 01:02:52
<b>Zn I24*</b>	<b>0.09430</b>	<b>0.5</b>	<b>1176.077</b>	<b>2940.193</b>
1	0.09466	Fondo: 0.00218		25/05/2016 01:03:20
2	0.09445	Fondo: 0.00221		25/05/2016 01:03:24
3	0.09379	Fondo: 0.00224		25/05/2016 01:03:29
<b>Zn I25*</b>	<b>0.18269</b>	<b>0.2</b>	<b>2308.190</b>	<b>5770.474</b>
1	0.18304	Fondo: -0.00082		25/05/2016 01:03:54
2	0.18256	Fondo: -0.00051		25/05/2016 01:03:58
3	0.18247	Fondo: -0.00073		25/05/2016 01:04:02
<b>Zn I26*</b>	<b>0.11183</b>	<b>0.1</b>	<b>1400.582</b>	<b>3501.455</b>
1	0.11191	Fondo: 0.00130		25/05/2016 01:04:29
2	0.11171	Fondo: 0.00083		25/05/2016 01:04:34
3	0.11186	Fondo: 0.00085		25/05/2016 01:04:38
<b>Zn I27*</b>	<b>0.09437</b>	<b>0.7</b>	<b>1177.030</b>	<b>2942.575</b>
1	0.09511	Fondo: 0.00220		25/05/2016 01:05:04
2	0.09425	Fondo: 0.00199		25/05/2016 01:05:09
3	0.09375	Fondo: 0.00209		25/05/2016 01:05:13

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 13. Análisis de varianza (ANOVA) bifactorial con repetibilidad

General Linear Model (MINITAB 17): masa zn versus temperatura, concentración

Method

Factor coding (-1, 0, +1),  $\alpha = 5\%$

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Temperatura	Fixed	3	T=25, T=40, T=85
Concentracion	Fixed	3	Cb = 0,1, Cb = 0,5, Cb = 0,9

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperatura	2	0,002679	0,001340	0,14	0,867
Concentracion	2	0,008488	0,004244	0,45	0,642
Temperatura*Concentracion	4	0,051728	0,012932	1,39	0,278
Error	18	0,167951	0,009331		
Total	26	0,230846			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0965950	27,25%	0,00%	0,00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,1600	0,0186	8,61	0,000	
Temperatura					
T=25	-0,0091	0,0263	-0,34	0,734	1,33
T=40	0,0139	0,0263	0,53	0,604	1,33
Concentracion					
Cb = 0,1	-0,0205	0,0263	-0,78	0,447	1,33
Cb = 0,5	-0,0023	0,0263	-0,09	0,930	1,33
Temperatura*Concentracion					
T=25 Cb = 0,1	0,0621	0,0372	1,67	0,112	1,78
T=25 Cb = 0,5	0,0018	0,0372	0,05	0,963	1,78
T=40 Cb = 0,1	-0,0580	0,0372	-1,56	0,136	1,78
T=40 Cb = 0,5	-0,0155	0,0372	-0,42	0,681	1,78

### Continuación del apéndice 13.

```

Regression Equation

Masa Zn = 0,1600 - 0,0091 Temperatura_T=25 + 0,0139 Temperatura_T=40
          - 0,0048 Temperatura_T=85 - 0,0205 Concentracion_Cb = 0,1 -
0,0023 Concentracion_Cb
          = 0,5 + 0,0228 Concentracion_Cb = 0,9
+ 0,0621 Temperatura*Concentracion_T=25 Cb =
  0,1 + 0,0018 Temperatura*Concentracion_T=25 Cb = 0,5
  - 0,0638 Temperatura*Concentracion_T=25 Cb = 0,9
  - 0,0580 Temperatura*Concentracion_T=40 Cb = 0,1
  - 0,0155 Temperatura*Concentracion_T=40 Cb = 0,5
  + 0,0735 Temperatura*Concentracion_T=40 Cb = 0,9
  - 0,0041 Temperatura*Concentracion_T=85 Cb = 0,1
  + 0,0138 Temperatura*Concentracion_T=85 Cb = 0,5
  - 0,0097 Temperatura*Concentracion_T=85 Cb = 0,9

Fits and Diagnostics for Unusual Observations
Std
Obs  Masa Zn    Fit  Resid  Std
   6   0,4575  0,2702  0,1873  2,37 R
R Large residual

```

Fuente: elaboración propia

### Apéndice 14. Análisis prueba F Fisher con $\alpha = 0,05$

#### Región rechazo hipótesis nula

$F_A \geq f_{A,\alpha,I-1,IJ(K-1)}$
$F_B \geq f_{B,\alpha,J-1,IJ(K-1)}$
$F_{AB} \geq f_{AB,\alpha,(I-1)(J-1),IJ(K-1)}$

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 15. Análisis F estadísticos (análisis Anova)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperatura	2	0,002679	0,001340	0,14	0,867
Concentracion	2	0,008488	0,004244	0,45	0,642
Temperatura*Concentracion	4	0,051728	0,012932	1,39	0,278
Error	18	0,167951	0,009331		
Total	26	0,230846			

$$F_A = 0,14$$

$$F_B = 0,45$$

$$F_{AB} = 1,39$$

F crítico (tabla F Fischer)

$$f_{A,0,05,2,18} = 3,55$$

$$f_{B,0,05,2,18} = 3,55$$

$$f_{AB,0,05,4,18} = 2,93$$

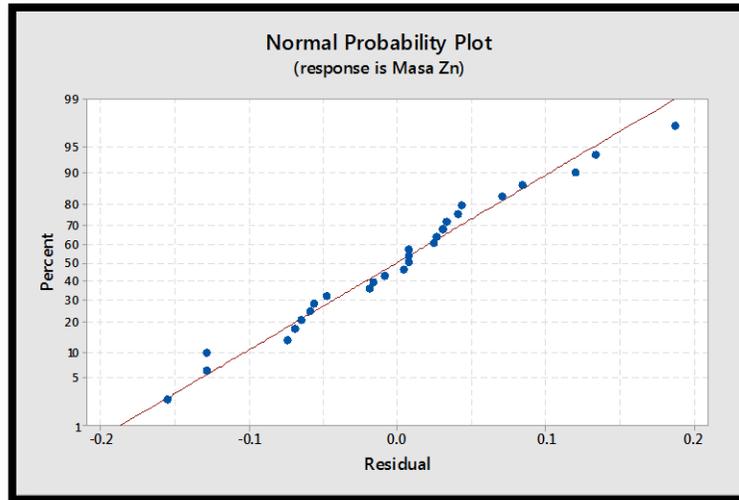
Fuente: elaboración propia

## Apéndice 16. Análisis comparación F estadístico de Fischer

<i>F Estadístico</i>	<i>f crítico de Fischer</i>	Factor de rechazo
$F_A = 0,14$	$f_{A,0,05,2,18} = 3,55$	$F_A \geq f_{A,\alpha,I-1,IJ(K-1)}$
$F_B = 0,45$	$f_{B,0,05,2,18} = 3,55$	$F_B \geq f_{B,\alpha,J-1,IJ(K-1)}$
$F_{AB} = 1,39$	$f_{AB,0,05,4,18} = 2,93$	$F_{AB} \geq f_{AB,\alpha,(I-1)(J-1),IJ(K-1)}$

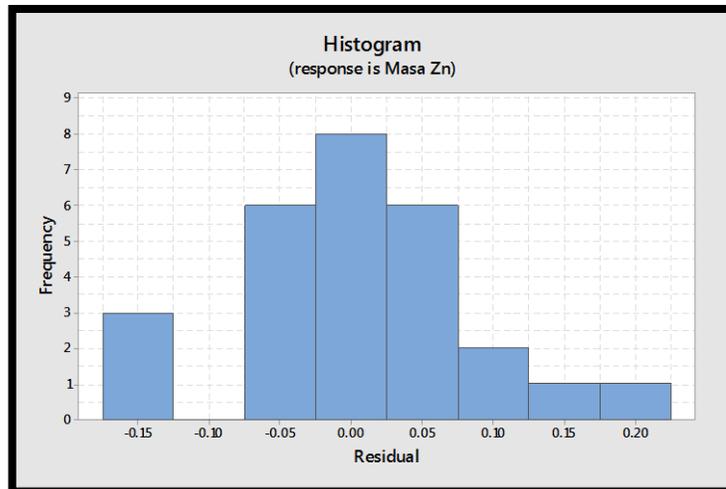
Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 17. Análisis, gráfica de probabilidad normal



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 18. Análisis de histograma



Fuente: elaboración propia.

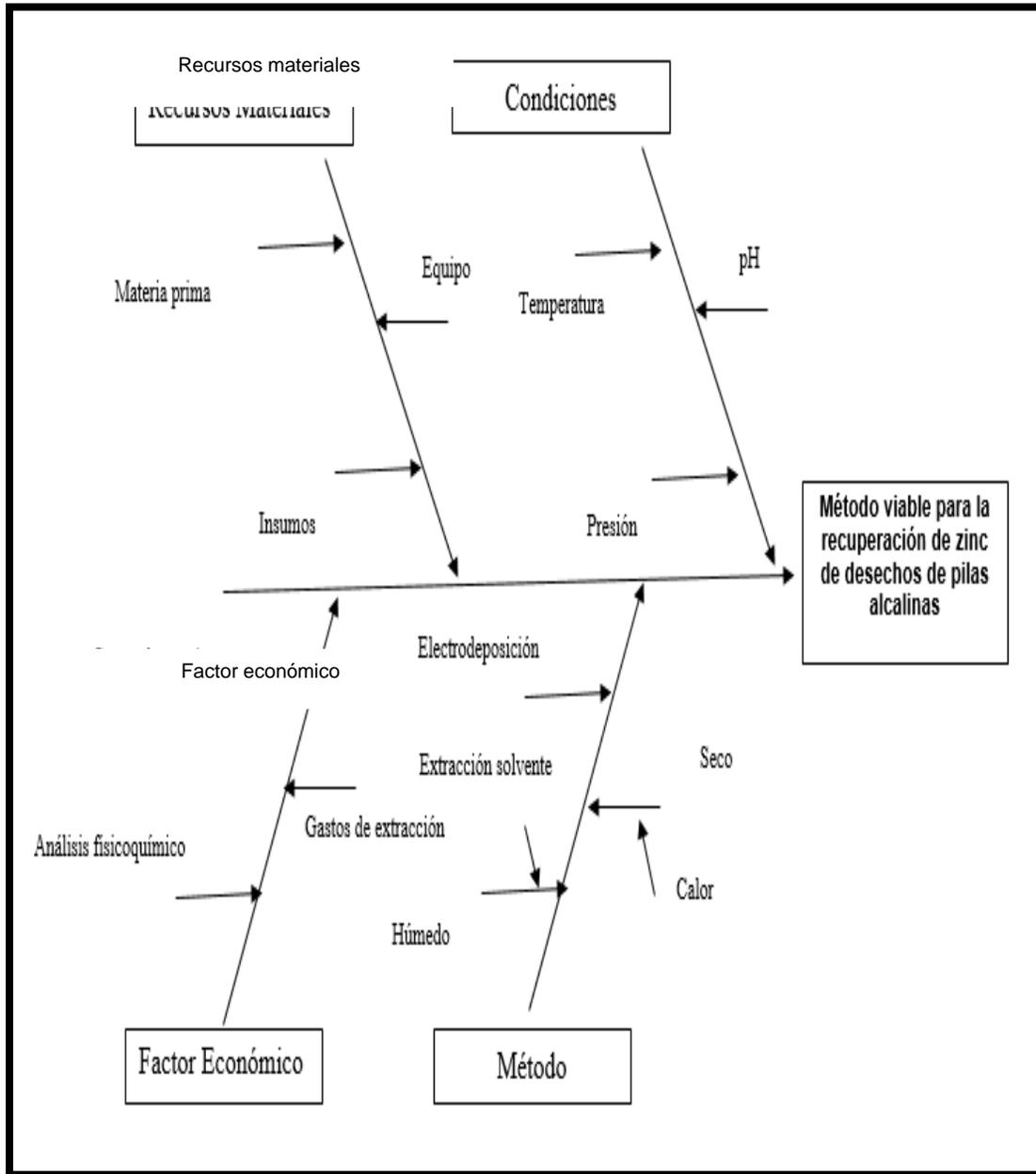


Apéndice 20. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera	Campos De conocimiento	Área	Curso	Tema específico	Temática
Ingeniería química	Ingeniería y tecnología	Química	Química 4	Electroquímica, equilibrio redox	Equilibrio redox en soluciones y celdas electroquímicas
		Área de ciencias básicas y complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva	Proporcionar elementos para establecer modelos matemáticos que expliquen los fenómenos
				Distribución de variables aleatorias	
			Estadística 2	Ensayos de hipótesis	proceso de toma de decisiones en los ensayos de hipótesis
		Área de especialización	Ciencia de los materiales	Materiales en la ingeniería	Conocimiento de los materiales y sus propiedades
		Fisicoquímica	Laboratorio de fisicoquímica 2	Celdas electroquímicas	Componentes y análisis de celdas electroquímicas
			Fisicoquímica 1	Equilibrio	Equilibrio químico de las soluciones

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

Anexo 1. **Espectroscopia de emisión por plasma Zn. Método basado en EPA 200.7 AQ – ICP/PRO – 116.**



Fuente: METALES S.A.C. Especificaciones técnicas polvo en zinc. <http://www.znmetal.com/el-polvo-de-zinc.php>. Consulta: 22 de agosto de 2016.

Anexo 2. **Microscopia electrónica de barrido con sistema de aseguramiento de calidad según NTP ISO / IEC 1705**

<b>Morfología de partícula</b>	<b>Esférica</b>
Gravedad específica	7.1
Retención malla 100	0.00
Retención malla 200	trazas
Retención malla 325 ( máximo)	0.5 %
Partículas de 1 a 5 micras	65 a 70 %
Menores de 1 micra	0.5 a 1 %
Mayor de 5 micras	29 a 34 %

Fuente: METALES S.A.C. Especificaciones técnicas polvo en zinc. <http://www.znmetal.com/el-polvo-de-zinc.php>. Consulta: 22 de agosto de 2016.