



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Tratamiento de soluciones lixiviadas para evaluar la recuperación de cobre por
electrodeposición**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Autora

Gianella Máryuri Romero Garro

Asesora

Mtra. Helen Analí Zapata Del Solar

Huacho - Perú

2026



**HELEN ANALÍ
ZAPATA DEL SOLAR
INGENIERA METALÚRGICA
Reg. CIP N° 174090**



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo NN 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Gianella Máryuri Romero Garro	76082694	27 de agosto del 2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Helen Analí Zapata Del Solar	44067559	https://orcid.org/0000-0002-5347-6155
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Máximo Tomas Salcedo Meza	15602588	https://orcid.org/0000-0002-6190-3794
Víctor Raúl Coca Ramírez	15601160	https://orcid.org/0000-0002-2287-7060
Joaquín José Abarca Rodríguez	15740291	https://orcid.org/0000-0003-1004-3824

Gianella Romero Garro 2026 - 029248

Tratamiento de soluciones lixiviadas para evaluar la recuperación de cobre por electrodeposición

 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FIQyM - PREGRADO - 2026

 Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

 Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3585611723

77 páginas

Fecha de entrega

2 jun 2026, 7:54 p.m. GMT-5

12.998 palabras

Fecha de descarga

2 jun 2026, 7:57 p.m. GMT-5

76.211 caracteres

Nombre del archivo

TESIS_-_GIANELLA_ROMERO_GARRO_12-04-2026.docx

Tamaño del archivo

3.2 MB



Página 2 de 82 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::1:3585611723

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A Dios, por sostenerme en cada paso y darme
la fortaleza necesaria.

A mi hija Mayella, la razón de mi esfuerzo y
el motor de todos mis sueños.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar aquí mi más sincero reconocimiento a la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, gracias a la cual he podido desarrollarme profesionalmente. Asimismo, agradezco a mi asesora de tesis, la Ing. Helen Zapata, por su guía constante, su paciencia y por compartir su valioso conocimiento durante cada etapa de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE ANEXO.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	xv
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.1. Descripción de la realidad problemática	21
1.2. Formulación del problema	23
1.2.1. Problema general	23
1.2.2. Problemas específicos	23
1.3. Objetivos de la investigación	23
1.3.1. Objetivo general.....	23
1.3.2. Objetivos específicos	24
1.4. Justificación de la investigación.....	24
1.5. Delimitaciones del estudio	26
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	28
2.1. Antecedentes de la investigación	28
2.1.1. Investigaciones internacionales	28
2.1.2. Investigaciones nacionales.....	29
2.2. Bases teóricas	31
2.2.1. Lixiviación	31

2.2.2.	Solución lixiviada de cobre.....	34
2.2.3.	Electrodeposición de cobre	37
2.2.4.	Variables de electrodeposición	37
2.2.5.	Diseño Factorial	38
2.3.	Definición de términos básicos	39
2.4.	Hipótesis de investigación.....	41
2.4.1.	Hipótesis general.....	41
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	41
CAPÍTULO III METODOLOGÍA		26
3.3.	Diseño metodológico.....	26
3.1.1.	Tipo de investigación.....	26
3.1.2.	Nivel de investigación.....	26
3.1.3.	Diseño de investigación	27
3.1.4.	Enfoque de investigación.....	27
3.4.	Población y muestra	27
3.2.1.	Población	27
3.2.2.	Muestra	28
3.4.3.	Diseño de la investigación	28
3.5.	Técnicas de recolección de datos	29
3.5.3.	Técnicas a emplear.....	29
3.1.5.	Descripción de los instrumentos	30
3.6.	Técnicas para el procedimiento de la información.....	30
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....		32

4.1.	Análisis de resultados.....	32
4.1.1.	Condiciones del experimento.....	32
4.1.2.	Resultados de la parte experimental	34
4.1.3.	Desarrollo de los resultados de la investigación	36
4.2.	Contrastación de hipótesis.....	43
4.2.1.	Contrastación de hipótesis general.....	43
4.2.2.	Contrastación de hipótesis específicas.....	45
CAPÍTULO V DISCUSIÓN.....		48
5.1.	Discusión de resultados.....	48
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		50
6.1.	Conclusiones.	50
6.2.	Recomendaciones.....	50
CAPÍTULO VII REFERENCIAS		52
7.1.	Referencias bibliográficas	52
ANEXOS		60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2 Variables del estudio.....	28
Tabla 3 Pruebas experimentales para la recuperación de cobre por electrodeposición.....	28
Tabla 4 Análisis químico de la solución barren de la electrodeposición del cobre	34
Tabla 5 Análisis del cobre electrolítico obtenido de las 10 pruebas.....	35
Tabla 6 Recuperación y calidad de cobre obtenido por electrodeposición.....	36
Tabla 7 Análisis de varianza de la recuperación de cobre por electrodeposición	43
Tabla 8 Análisis de ANOVA de la calidad de cobre por electrodeposición en relación distancia, tiempo y voltaje.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de la celda electrolítica	33
Figura 2	La ley del cobre obtenido por electrolítico en relación de la distancia y voltaje	37
Figura 3	Calidad de cobre obtenido en relación del tiempo y la distancia	38
Figura 4	Ley del cobre electrolítico obtenido en relación al voltaje y tiempo	39
Figura 5	Recuperación por electrodeposición de cobre vs distancia y voltaje	40
Figura 6	En relación del voltaje y el tiempo la recuperación del cobre por electrodeposición ...	41
Figura 7	Recuperación de cobre electrolito en relación de la distancia y tiempo.....	42
Figura 8	Diagrama de Pareto de la recuperación de cobre por electrodeposición en relación del voltaje, distancia y tiempo	44
Figura 9	Diagrama de Pareto en la calidad de cobre por electrodeposición en relación de voltaje, tiempo y distancia	46

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo 1 Ubicación Geográfica de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.....	61
Anexo 2 Matriz de Consistencia	62
Anexo 3 Condiciones y análisis de solución barren	63
Anexo 4 Análisis de cobre electropositado.....	63
Anexo 5 Electrodeposición de cobre	64
Anexo 6 Peso de la lámina de acero sin y con cobre depositado.....	64
Anexo 7 Cobre precipitado en el microscopio.....	65

RESUMEN

El propósito de la investigación fue evaluar la recuperación y la calidad del cobre obtenido a partir de soluciones lixiviadas mediante el proceso de electrodeposición. Para ello, se determinó la influencia del voltaje, la distancia ánodo-cátodo y el tiempo sobre las respuestas metalúrgicas. El estudio se realizó mediante un enfoque experimental, cuantitativo y con un diseño factorial 2^3 , que abarcó dos puntos centrales, correspondientes a diez carreras. Las pruebas se llevaron a cabo en una celda de laboratorio (18×6×5 cm) con 200 mL de electrolito, con un Cu inicial de 1,14 g/L, H₂SO₄ de 30 g/L, pH 1,5 y 30 °C, utilizando ánodos de plomo y cátodo de acero inoxidable 316L/304, operando alrededor de 2,25 V y 0,75 A según la condición experimental. Los resultados obtenidos demostraron una alta recuperación de cobre, con valores máximos que alcanzaron el 77,72 % y el 77,29 % en las corridas centrales. Además, se observó una calidad del depósito que osciló entre el 91,2 % y el 94,8 % Cu, alcanzando su punto máximo en la condición de mayor voltaje, menor distancia y mayor tiempo. El análisis de la varianza (ANOVA) demostró que el tiempo, el voltaje y la distancia fueron factores significativos en el proceso de recuperación ($p < 0.05$), siendo el tiempo el componente más relevante. Además, se observó que el tiempo, el voltaje y la distancia también tuvieron un impacto significativo en la calidad, mientras que las interacciones no mostraron un efecto relevante. Tras una profunda evaluación, se ha llegado a la conclusión de que el tratamiento aplicado a las soluciones lixiviadas logra un desempeño óptimo de la electrodeposición bajo las condiciones evaluadas. Se concluye, se lograron mejoras significativas en la recuperación y la calidad.

Palabras claves: Electrodeposición, soluciones lixiviadas, recuperación de cobre, calidad del cobre depositado.

ABSTRACT

The purpose of the research was to evaluate the recovery and quality of copper obtained from leached solutions through the electrodeposition process. To this end, the influence of voltage, anode-cathode distance, and time on metallurgical responses was determined. The study was conducted using an experimental, quantitative approach with a 2^3 factorial design, covering two central points corresponding to ten runs. The tests were carried out in a laboratory cell (18×6×5 cm) with 200 mL of electrolyte, with an initial Cu of 1.14 g/L, H₂SO₄ of 30 g/L, pH 1.5, and 30 °C, using lead anodes and 316L/304 stainless steel cathodes, operating at around 2.25 V and 0.75 A depending on the experimental condition. The results obtained demonstrated high copper recovery, with maximum values reaching 77.72% and 77.29% in the central runs. In addition, deposit quality ranged from 91.2% to 94.8% Cu, reaching its peak under the conditions of highest voltage, shortest distance, and longest time. Analysis of variance (ANOVA) showed that time, voltage, and distance were significant factors in the recovery process ($p < 0.05$), with time being the most relevant component. In addition, time, voltage, and distance were also found to have a significant impact on quality, while interactions did not show a relevant effect. After thorough evaluation, it was concluded that the treatment applied to the leached solutions achieves optimal electrodeposition performance under the conditions evaluated. In conclusion, significant improvements in recovery and quality were achieved.

Key words: Electrodeposition, leached solutions, copper recovery, quality of deposited copper.

INTRODUCCIÓN

Recuperar cobre de soluciones lixiviadas es importante en la metalurgia moderna porque permite obtener un producto metálico de forma controlada y con menos complejidad térmica. La electrodeposición convierte el Cu^{2+} disuelto en cobre metálico sobre un cátodo. Así, se puede recuperar valor de soluciones de lixiviación ácida y estudiar el comportamiento del sistema en condiciones de laboratorio. Esta tecnología es atractiva porque es selectiva, puede producir cobre de alta pureza y es fácil de usar para controlar las variables eléctricas y fisicoquímicas durante el proceso.

La calidad del depósito de electrodeposición depende de varios factores, no solo de la presencia de Cu^{2+} . El voltaje influye en la velocidad y en las reacciones; la distancia entre ánodo y cátodo modifica la caída de tensión y la corriente; y el tiempo de operación determina la cantidad de cobre extraído y cómo cambia la forma del depósito. También hay otros factores como la concentración de ácido sulfúrico, el pH y la temperatura, que afectan a la conductividad, la estabilidad del medio y la formación de depósitos.

La electrodeposición depende de la cinética controlada por difusión y de fenómenos de nucleación y crecimiento. Estos cambian con el potencial, la temperatura o la composición del electrolito. Pero a menudo se estudian cambiando un factor a la vez, lo que hace difícil ver los efectos combinados y definir las condiciones óptimas con precisión. Por eso, hay que usar métodos que permitan ver cómo afectan las diferentes variables y saber lo importantes que son.

La tesis «Tratamiento de soluciones lixiviadas para evaluar la recuperación de cobre por electrodeposición» es experimental y cuantitativa. Su diseño factorial 2^3 evalúa el efecto del voltaje, la distancia ánodo-cátodo y el tiempo de electrodeposición. Las pruebas se hacen en una celda electrolítica de laboratorio con electrolito $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$, controlando condiciones de pH y

temperatura, y utilizando ánodos de plomo y cátodo de acero inoxidable. Los resultados permitirán hacer combinaciones que maximicen la recuperación y mantengan la calidad del cobre depositado. Así, se podrán tener criterios técnicos reproducibles para optimizar y para futuras investigaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.Descripción de la realidad problemática

En el contexto global, se evidencia que las compañías mineras de cobre están actualmente enfrentando un desafío considerable en términos de satisfacer la demanda futura del mercado. A medida que los precios del cobre se mantienen en niveles extremadamente altos, alcanzando cotizaciones cercanas a sus máximos históricos, se prevé que se llevan a cabo expansiones en la vida útil de las minas existentes y que se inyecten nuevas inversiones en la industria. No obstante, hasta la fecha, las inversiones anunciadas no se consideran suficientes y según las proyecciones de CRU, se anticipa una brecha de aproximadamente seis millones de toneladas entre la oferta y la demanda a principios de la década de 2030. Para poner en perspectiva esta cifra, la producción total de minas en 2021 se situó ligeramente por encima de los 21 millones de toneladas (MinerAndina, 2022).

En el ámbito sudamericano, específicamente en Chile, durante el año 1980, se encontraba en operación la mina Lo Aguirre, perteneciente a la Sociedad Minera Pudahuel (SMP), ubicada a 30 km al oeste de Santiago, evidenció la necesidad de búsqueda de soluciones e implementación de nuevas tecnologías, El análisis del yacimiento en cuestión evidencia que este era de reducidas dimensiones y elevada complejidad desde la perspectiva mineralógica, lo cual imposibilitaba su explotación económica mediante las tecnologías disponibles en el período. Esta circunstancia contribuyó a que Lo Aguirre se convirtiera en el punto de partida para el desarrollo de nuevas tecnologías de recuperación de cobre. El proceso de lixiviación en pilas TL demostró una capacidad para incrementar la velocidad del proceso, lo que resultó en un aumento de los rendimientos y la eficiencia. Este proceso permitió el tratamiento simultáneo y sucesivo de

minerales oxidados y sulfurados en una única instalación. La lixiviación (SX) y la electrodeposición (EW) representaron innovaciones tecnológicas significativas debido a sus bajos costos de capital y de operación. Además, estos procesos fueron más limpios y permitieron el procesamiento de minerales de muy baja ley. En 1996, Chile experimentó un hito significativo en su industria minera al alcanzar el primer puesto en la producción mundial de cobre mediante el proceso SX-EW, con una producción de 635 700 TM de cátodos, desplazando a Estados Unidos (Media Group SPA, 2010).

En el Perú, la gran y mediana minería están implementado la electrodeposición como método de recuperación, en su mayoría para el zinc. Y en el 2021, el proyecto de Mina Justa ubicado en la ciudad de Marcona de Ica, la implementación de la operación comercial se inició mediante la aplicación de procesos de lixiviación en bateas, empleando agua de mar como reactivo principal. Estas estructuras, con dimensiones aproximadas de $46 \times 36 \times 14$ m, se organizan en 15 unidades alineadas a lo largo de casi 700 m. La solución rica generada alcanza cerca de 38 g/L de cobre y, posteriormente, es sometida a un proceso de extracción por solventes y electrodeposición. La mina contribuye con aproximadamente 100 000 toneladas métricas de cátodos de cobre de alta pureza, con una producción estimada de 58 000 toneladas de cátodos de cobre, constituyéndose a nivel nacional como la segunda operación minera en usar agua de mar (Route One Americas, 2020).

Sin embargo, dentro del proceso de electrodeposición varios autores han realizado investigaciones y han dado con que existen restricciones en las celdas típicas de electrodeposición buscando maneras de superarlas; por lo que han evaluado diversos diseños de celdas, y se han comprobado que de acuerdo a este factor ocurren disminuciones en los valores energéticos en contraste con los diseños convencionales (Centeno Cuba, 2016).

Finalmente, en el marco de la presente investigación, se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo sobre la electrodeposición de soluciones lixiviadas en un entorno de laboratorio. Este enfoque metodológico ha permitido obtener resultados significativos que, se buscan identificar las áreas de conocimiento que puedan estar incompletas. El propósito de este estudio es determinar la incidencia de diversos factores, tales como la relación entre el ánodo en cuestión y el cátodo, el voltaje aplicado y el tiempo de exposición, en el rendimiento del proceso de obtención de dicho elemento.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿En qué medida el tratamiento de soluciones lixiviadas influye en la recuperación de cobre por el proceso de electrodeposición?

1.2.2. Problemas específicos

¿En qué medida influencia la distancia entre ánodo y cátodo sobre la calidad de cobre recuperado mediante el proceso de electrodeposición?

¿En qué medida influencia el voltaje sobre la calidad de cobre recuperado mediante el proceso de electrodeposición?

¿En qué medida influencia el tiempo sobre la recuperación de cobre mediante el proceso de electrodeposición?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del tratamiento de soluciones lixiviadas sobre la recuperación de cobre por el proceso de electrodeposición.

1.3.2. Objetivos específicos

Determinar la influencia de la distancia entre ánodo y cátodo sobre la calidad de cobre recuperado por el proceso de electrodeposición.

Determinar la influencia del voltaje sobre la calidad de cobre recuperado por el proceso de electrodeposición.

Determinar la influencia del tiempo sobre la recuperación de cobre por el proceso de electrodeposición.

1.4. Justificación de la investigación

El tratamiento de soluciones lixiviadas para evaluar la recuperación de cobre por electrodeposición, es un tema de investigación y aplicación práctica importante y relevante debido a sus beneficios potenciales en términos de reducción de costos, recuperación de recursos, gestión de residuos, cumplimiento normativo, desarrollo tecnológico y sostenibilidad ambiental. El presente estudio tiene como objetivo principal analizar los efectos que la implementación de un nuevo enfoque en la actividad minera podría tener en la mejora de la eficiencia operativa y en el compromiso ambiental de dicha actividad. En consecuencia, se espera que esta investigación genere un efecto relevante en los aspectos mencionados, justifica una atención continua y un estudio más profundo en este campo con una visión que sea de utilidad profesional y obtenga reproducción de información para implementaciones y mejoras continuas en industrias nacionales e internacionales con la finalidad de obtener beneficios ambientales, económicos y sociales.

El fundamento científico de la electroobtención reside en los mecanismos de transferencia de masa y carga que ocurren en medios de electrolitos sulfatados. En este contexto, variables operativas como el potencial aplicado, la configuración geométrica de los electrodos (distancia) y la cinética temporal no son solo parámetros aislados, sino determinantes críticos que rigen la

eficiencia del proceso, el balance energético y la integridad morfológica de los cátodos obtenidos (Panda & S, 2001).

En estrecha relación con lo anterior, y desde una perspectiva metodológica, el análisis de dichas variables se aborda mediante un diseño factorial 2^3 con puntos centrales. Esta estrategia permite estimar con precisión efectos lineales e interacciones complejas, optimizando la potencia estadística y garantizando la reproducibilidad de los resultados con una carga experimental eficiente (Montgomery, 2017).

Dicha rigurosidad metodológica se complementa técnicamente con la implementación de mediciones normalizadas de pH, temperatura y caracterización química, procedimientos que aseguran la trazabilidad y comparabilidad de los datos obtenidos frente a los estándares de la industria (Brown y otros, 2004; Young y otros, 2019).

Bajo esta misma línea de optimización de procesos, el estudio adquiere una dimensión ambiental significativa al proponer la electrodeposición como una ruta hidrometalúrgica que prescinde de las emisiones asociadas a la fundición. No obstante, dado que este proceso genera neblina ácida en los ánodos, la estabilización de los parámetros operativos se vuelve imperativa para mitigar riesgos e impactos en el entorno de laboratorio (San Martín y otros, 2005). Este control ambiental deriva directamente en un beneficio social y de seguridad ocupacional, pues al evaluar la tríada voltaje-distancia-tiempo, se logra una formación práctica más segura que minimiza la exposición de los operadores a agentes químicos nocivos (San Martín y otros, 2005).

Finalmente, la convergencia de estos factores técnicos y ambientales se traduce en una clara ventaja económica. La optimización aquí planteada busca reducir el consumo específico de energía, el cual representa uno de los mayores costos operativos en la producción de cobre electrolítico, con rangos que oscilan típicamente 1,5 y 2,5 kWh/kg (Hannula y otros, 2019). De

este modo, la investigación no solo aporta al conocimiento académico, sino que propone una ruta hacia la eficiencia de costes y la competitividad industrial.

1.5.Delimitaciones del estudio

El propósito de este estudio radica en la investigación titulada “Tratamiento de soluciones lixiviadas para evaluar la recuperación de cobre por electrodeposición”. El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales, una entidad de laboratorio adscrita a la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, en el área de Metalurgia Extractiva. El centro de investigación se encuentra emplazado en la denominada Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, localizada en la provincia antes mencionada de Huaura y en el distrito correspondiente a Huacho. Esto implica que el estudio se circunscribe al área geográfica del Norte Chico, en la Región Lima, Perú (UNJFSC, 2024). El laboratorio, ubicado a altitudes aproximadas estimadas de 30 metros según las coordenadas proporcionadas, constituye un entorno propicio para la realización de investigaciones y análisis de gran precisión, con las siguientes coordenadas: Estos 213 000 metros, Norte 8 693 000 metros, de acuerdo con el sistema de coordenadas UTM (WGS84, zona 18S) (google earth, 2025). Durante la fase experimental, se mantuvo una temperatura de operación de 30 °C en la celda, y a nivel ambiental, se consideró un rango típico de laboratorio de 20–28 °C con una humedad relativa aproximada del 60–80 % (Atlas weather, 2025). El estudio se desarrolló en el período correspondiente al calendario gregoriano del año 2025, abarcando las etapas de acondicionamiento de la solución lixiviada, corridas experimentales de electrodeposición y procesamiento estadístico de resultados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Investigaciones internacionales

Ojeda (2020); público en la Universidad Autónoma de Zacatecas (México), donde se llevó a cabo una investigación electroquímica experimental con el objetivo de evaluar la electrodeposición de oro y teluro desde soluciones cianuradas. El estudio se llevó a cabo en condiciones de laboratorio: pH 13, 25 °C, 3,0 V y 24 horas, con 100 ppm de Au, 129,56 ppm de Te y 52,8 ppm de CN^- . Los resultados mostraron que la reducción del oro está controlada por difusión y presenta un coeficiente notablemente superior ($1,1463 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$) al del teluro ($1,0823 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$), lo que justifica su mayor velocidad de deposición. Se obtuvieron recuperaciones del 20,93 % para el oro y del 17,65 % para el teluro, pero sin selectividad. El cátodo retuvo un 18,93 % p/p de oro y solo un 2,5 % p/p de teluro, ya que este último se redondeó y se desprendió. En conclusión, los parámetros probados no permiten una separación selectiva, por lo que es necesario ajustar el potencial y buscar estrategias para mejorar la adhesión del teluro.

Sampayo (2022); en su investigación experimental desarrollada en la Universidad Autónoma Metropolitana de México, evaluó la recuperación electroquímica de cobalto y litio desde baterías de iones de litio residuales empleando disolventes eutécticos profundos (DES) como medio lixivante y electrolítico. En un laboratorio, se estudiaron polvos catódicos de celdas gastadas. Para esto, se usaron técnicas analíticas (como SEM, EDS y XPS) y métodos electroquímicos. De esta forma, se pudo caracterizar y cuantificar los metales disueltos. Los resultados evidenciaron la eficacia de la lixiviación del cobalto por el DES, lo que confirmó su deposición en el electrodo de vidrio-carbón (GCE) y permitió su cuantificación precisa. Además,

los datos experimentales de los licores de lixiviación fueron ajustados óptimamente por el modelo teórico de nucleación y crecimiento. Se ha llegado a la conclusión de que los DES son una opción viable y viable a largo plazo para recuperar de forma selectiva metales esenciales a partir de residuos electrónicos. Además, se ha comprobado que la velocidad de deposición del cobalto se puede prever, lo que da pie a la aplicación de este proceso en el ámbito industrial dentro del marco de la economía circular.

Azpeitia (2022); llevó a cabo una investigación experimental en la Universidad Nacional de La Plata (Argentina), cuyo objetivo fue generar nueva información relacionada con la electrodeposición de estaño, con el fin de aplicarlo como ánodo en baterías de ion-litio. El estudio se centró en la deposición de estaño sobre cobre en ambientes ácidos y disolventes eutécticos profundos (reline y etalina), variando la temperatura y la concentración de tiourea. Los estudios mostraron que cuando se reduce la temperatura y se aumenta la concentración de tiourea, el inicio del proceso se desplaza a potenciales más negativos, por lo que la deposición ocurre tanto en condiciones de subpotencial (UPD) como de sobrepotencial (OPD). Además, se corroboró que los DES son opciones factibles en comparación con los electrolitos ácidos, evidenciándose cierta sensibilidad cinética con la temperatura cuando se encuentran en estado de equilibrio, atribuible a variaciones notables en la viscosidad. En conclusión, la combinación de métodos electroquímicos y de análisis superficial permitió comprender mejor el mecanismo y la cinética del proceso, lo que sentó las bases para el diseño de ánodos de estaño más eficientes.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Aguilar (2021); en su tesis empírica para la universidad nacional de Huacho, propuso el desarrollo de una celda de electrodeposición para cobre ejecutable en pruebas de laboratorio, observo que es posible mejorar ciertos parámetros con el propósito de optimizar la eficacia

operativa. El ensayo se llevó a cabo utilizando condiciones controladas: una densidad de corriente de 350 A/m², una temperatura de 40 °C, un cátodo de acero de 10 x 12 x 15 cm y un ánodo de plomo de 5 x 0,2 x 10 cm, y se realizaron tres ensayos experimentales. Los hallazgos revelaron una recuperación de cobre del 72 % respecto al total procesado, lo que demuestra la eficiencia operativa del diseño propuesto. Además, se descubrió que hay cosas que afectan directamente cómo funciona y la calidad del depósito metálico. Estas cosas son el control de impurezas en el electrolito, la densidad de corriente aplicada y la temperatura del baño. La conclusión a la que se llega es que la celda diseñada es una alternativa funcional y reproducible para estudios de electrodeposición de cobre a nivel académico. Esto proporciona una plataforma en la que se pueden evaluar variables electroquímicas y que contribuye a entender los mecanismos de transferencia de masa y nucleación metálica en sistemas de recuperación de cobre.

Lizzetti (2021), en una rigurosa investigación experimental para la universidad mencionada anteriormente, se centró en la recuperación de cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante el uso de la electrodeposición, con el fin de optimizar las variables operativas a escala de laboratorio.

Mediante el uso de un electrolito de sulfato de cobre (8,15g/L de Cu²⁺) con un pH ajustado a 1, la investigación estableció que operar en un rango de potencial de 1,5 a 1,8 V es imperativo para prevenir la pasivación por formación de óxidos catódicos. Los resultados experimentales, que reportaron recuperaciones de masa superiores a los 10,600 mg por corrida, confirman que una adecuada conductividad iónica y una distancia interelectródica reducida (1-2 cm) permiten validar la viabilidad técnica del proceso, minimizando simultáneamente las reacciones parasitarias que comprometen la pureza del metal. Se concluye que el control del potencial eléctrico resulta crítico para maximizar la recuperación y minimizar las reacciones parasitarias. En este sentido, se recomienda el empleo de ánodos de aleación Pb-Ca-Sn debido a su estabilidad electroquímica. En

consecuencia, se plantea la necesidad de realizar estudios futuros en el rango de 45-55 °C, con el propósito de evaluar el efecto de la temperatura en la cinética de deposición, la morfología del depósito y la eficiencia energética del proceso de recuperación de cobre.

Briones & Linares (2020) desarrollaron un estudio experimental para la Universidad Privada del Norte (Cajamarca), para cuantificar la recuperación de cobre a partir de malaquita mediante el proceso de electrodeposición. Previo al proceso metalúrgico, se determinó mediante un análisis geológico la alta pureza de la materia prima, registrando una ley del 96,8%. La fase experimental se ejecutó bajo un régimen de corriente de 1,00 a 2,00 A con un tiempo de residencia de una hora, condiciones que permitieron alcanzar una recuperación metalúrgica del 96,8%. Los autores concluyen que la sistematización de las variables operativas y el control del intervalo de amperaje son determinantes para garantizar la reproducibilidad y la alta eficiencia en el tratamiento de minerales oxidados. Este estudio presenta un método aplicable para la recuperación de cobre a pequeña escala, que integra la caracterización geológica y la optimización electroquímica. Constituyendo una alternativa prometedora para el aprovechamiento sostenible de recursos minerales en comunidades mineras artesanales.

2.2.Bases teóricas

2.2.1. Lixiviación

El análisis de los datos expuestos evidencia que el proceso de lixiviación corresponde a una serie de pasos o etapas de orden físico-químico, en donde se produce la desintegración selectiva de los metales contenidos en el material resultante del proceso de chancado. Dicho fenómeno se produce mediante la aplicación de agentes lixiviantes disueltos en una solución acuosa. Previamente al proceso de lixiviación, se implementa el procedimiento de aglomeración,

el cual es comúnmente ejecutado en contenedores cilíndricos donde se vierte el mineral junto con agua y el agente lixiviante, resultado que se evidencia cuando los metales de interés quedan disueltos y contenidos en dicha solución (Portal Minero S.A., 2006).

La lixiviación de minerales de cobre, generalmente realizada en pilas, de acuerdo a la dinámica del sólido puede ser considerada lixiviación dinámica o lixiviación estática; y de acuerdo al agente lixiviante puede ser considerada lixiviación básica (amoníaco y aminas, la soda cáustica y sulfuros, y el cianuro) o lixiviación ácida (ácido sulfúrico, sulfatos) (MAHA ICMI, 2017).

2.2.1.1. De acuerdo a la dinámica del sólido.

- a) *Lixiviación dinámica*: En el proceso de lixiviación tipo “on-off”, el mineral es retirado tras la extracción de los elementos valiosos y dispuesto en botaderos. La base de la pila, concebida como un escenario reutilizable, es preparada nuevamente para recibir nuevo mineral, lo que optimiza los recursos y el espacio (CODELCO, 2019).
- b) *Lixiviación estática*: Cuando el procedimiento de renovación de capas implica la disposición de nuevas pilas sobre las previas, con la determinación de reutilizar o desechar su base impermeable protectora (CODELCO, 2019).

2.2.1.2. De acuerdo al agente lixiviante.

a) *Lixiviación ácida*

Los compuestos ácidos actúan como agentes disolutivos, que facilitan la liberación de óxidos metálicos naturales, tales como el cobre, el zinc y el estaño, revelando así su contenido mineral. Entre las sustancias lixiviantes más comúnmente utilizadas, cabe destacar el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico, cuya elección se determina en función del mineral y la eficiencia deseada:

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4): Consagrado como el agente de mayor difusión en la metalurgia extractiva, su predominancia se debe a una combinación de viabilidad económica y afinidad química. Según (Simpson, 2003). este compuesto destaca por su bajo costo operativo y una cinética de reacción favorable para la disolución de especies minerales. Su uso es un estándar en la recuperación de metales base como el cobre, níquel, cromo y zinc, permitiendo la generación de electrolitos estables para procesos de electro-obtención.
- Ácido clorhídrico (HCl): Representa la segunda alternativa de mayor impacto debido a su elevada solubilidad y naturaleza de ácido fuerte. Su capacidad para disociarse completamente en solución acuosa maximiza su poder disolvente, lo que facilita el tratamiento de minerales complejos. En la práctica metalúrgica, el HCl es fundamental para la recuperación de metales de alto valor como el cadmio y el zinc, aprovechando su reactividad para optimizar procesos hidrometalúrgicos donde otros ácidos presentan limitaciones de solubilidad (Ropp, 2013).
- Ácido nítrico (HNO_3): A diferencia de los anteriores, el ácido nítrico actúa como un agente oxidante de alta potencia. Esta propiedad es crítica cuando se requiere la extracción de metales nobles o de transición (como el Au y la Ag) que se encuentran integrados en matrices minerales resistentes. Su aplicación permite una lixiviación selectiva y una recuperación química de alta precisión bajo condiciones controladas de laboratorio e industria (Mendham et al., 2000).

b) Lixiviación básica:

Además de los medios ácidos, la hidrometalurgia emplea agentes específicos cuya efectividad radica en su capacidad de formación de complejos estables con metales de transición y metales preciosos. Entre los componentes más relevantes destacan:

- Amoníaco (NH_3): Este compuesto destaca por su elevada solubilidad acuosa y su rol determinante en la lixiviación de metales base. Su importancia radica en su capacidad como ligando para la formación de complejos aminados, facilitando la disolución selectiva mediante la transferencia eficiente de electrones y la estabilización de los iones metálicos en solución (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991).
- Cianuro (CN^-): Consagrado como el agente lixivante por excelencia para la recuperación de metales preciosos, el cianuro es el reactivo principal en los procesos de cianuración de oro y plata. Químicamente, su eficacia se debe a la formación de ciano-complejos de alta estabilidad termodinámica. No obstante, su implementación industrial exige protocolos de seguridad y contingencia rigurosos debido a su elevada toxicidad y los riesgos potenciales para la salud humana y el ecosistema (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991). A pesar de su carácter crítico, su selectividad y rendimiento lo mantienen como el estándar operativo en la minería de metales nobles.

2.2.2. Solución lixiviada de cobre

La solución lixiviada de cobre, también conocida como solución acuosa, es la que tiene una alta concentración de agentes lixiviantes y se refiere como la fase que transporta el metal o metales de interés para su procesamiento mediante extracción; esto se conoce como PLS /pregnant

liquor solution). Después de pasar por el proceso de extracción se transforma en una solución pobre o refinada, y a menudo se devuelve al proceso de lixiviación (CODELCO, 2019).

2.2.2.1.Solución rica

También conocida como PLS, es la que contiene cobre en estado disuelto, junto a otras sustancias no deseadas, la cual se obtiene de la fase de lixiviación. Esta solución se somete a un procedimiento de extracción por solventes (SX) para ser purificada y aumentar su concentración de cobre (CODELCO, 2019).

El PLS tiene cuatro características que se pueden ajustar para lograr una purificación más eficiente del metal a través de la extracción, los cuales son:

- El nivel de acidez contenido en la solución libre
- El análisis del potencial de las reacciones de oxidación-reducción (expresado como el nivel Eh) es un aspecto relevante en los estudio de los procesos.
- La presencia de ligandos negativos (cloruros, sulfatos o cianuros) es crucial para estabilizar complejos metálicos, garantizando la solubilidad y selectividad iónica requerida en la fase de lixiviación.
- La temperatura regula de forma crítica la cinética de transferencia de masa y el equilibrio químico, optimizando la separación de fases y minimizando las pérdidas operativas por arrastre.

2.2.2.2.Purificación

La refinación del cobre se logra mediante la técnica de extracción por solventes, un método diseñado para asegurar la máxima pureza del electrolito y optimizar la eficiencia metalúrgica del sistema global.

Extracción por Solventes (SX)

Este proceso, técnicamente descrito como «intercambio iónico líquido», es una etapa fundamental en la hidrometalurgia para la purificación y enriquecimiento de soluciones cargadas. El mecanismo consiste en la transferencia selectiva de iones metálicos desde una fase acuosa (licor de lixiviación) hacia una fase orgánica inmiscible o extractante. Esta última fase destaca por su alta especificidad química, permitiendo la formación de complejos organometálicos estables que facilitan la separación de impurezas y la concentración del metal de interés (Portal Minero S.A., 2006).

Según, (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2021); el procedimiento en cuestión puede ser segmentado en tres fases primordiales.:

1. El procedimiento de incorporación del líquido extractante requiere la combinación con el ion metálico dentro de la solución primaria.
2. El procedimiento implica la separación del complejo extractante-ion metálico de la solución inicial, para posteriormente trasladarlo a una solución secundaria que contiene una baja concentración del ion mencionado.
3. La fase posterior a la reextracción o a la descarga de la solución acuosa secundaria, en la que el elemento de interés se somete a un proceso de purificación para eliminar impurezas y prepararlo para el proceso de electroobtención.

Los propósitos que se persiguen al integrar el proceso de SX en la operación metalúrgica pueden abarcar los siguientes puntos:

- En el ámbito de la industria metalmecánica, la separación y proceso de purificación de metales desde soluciones que los contienen, implica la extracción de los metales de interés

o la eliminación de impurezas, dejando los metales deseados en la solución (procedimiento de purificación).

- Es imperativo minimizar la concentración de metales presentes en la solución, con el fin de disminuir los volúmenes que deben tratarse posteriormente, facilitando así el proceso de trabajo.
- El proceso de extracción de metales de una solución de complejidad a otra de naturaleza acuosa, simplifica significativamente los pasos subsecuentes del proceso.

2.2.3. Electrodeposición de cobre

En este procedimiento comprende la extracción del metal desde una adecuada solución de lixiviación, denominada solución electrolítica, y su posterior deposición en un cátodo mediante un proceso de electrólisis. Este fenómeno se produce al aplicar una corriente eléctrica continua de baja intensidad a través de la solución electrolítica, lo que resulta en la formación de un circuito con ánodos y cátodos. En consecuencia, los iones del metal deseado (cationes) son atraídos hacia el cátodo (el polo con carga negativa) y se depositan en él, mientras que las impurezas se mantienen disueltas en la solución electrolítica o se precipitan como residuos o barros anódicos. El proceso de electroobtención constituye una relevante estrategia de valor económico, dado que facilita la recuperación de metales como el cobre, el oro y la plata a partir de fuentes lixiviables. En ausencia de este procedimiento, dichas fuentes resultarían económicamente inviables (CODELCO, 2019).

2.2.4. Variables de electrodeposición

Las variables de electrodeposición son aquellas que pueden producir que ocurra una variación de resultados para la realización del proceso, dentro de ellas tenemos al tiempo, el pH, la distancia ánodo-cátodo, el amperaje (densidad de corriente), el voltaje, concentración de soluciones, concentración de ácido sulfúrico, entre otros.

De las variables que se ha hecho mención anteriormente, para la realización de este proyecto de investigación tomaremos tres, las cuales son el tiempo, la distancia ánodo-cátodo y el voltaje. Para comprender mejor de la influencia de estas, se desarrollarán brevemente a continuación:

2.2.4.1.Tiempo

A medida que pase el tiempo, los iones cargados positivamente, en este caso el cobre, se irá acumulando en los cátodos de acero. Es relevante considerar que a medida que el metal se acumule en el cátodo, la velocidad de deposición en la solución disminuirá gradualmente y el proceso de deposición se volverá más lento (EMEW, 2023). Por lo que se interpreta que, a mayor tiempo, mayor recuperación del metal. Por lo tanto, el tiempo de tomas de muestras variará de min=20 minutos a máx=30 minutos.

2.2.4.2.Distance ánodo-cátodo

La configuración geométrica de la celda, específicamente el espaciamiento entre el ánodo y el cátodo, es un parámetro crítico que condiciona tanto la calidad del depósito como la resistencia a la corrosión de las capas metálicas obtenidas (Jiménez, 2011). Para los fines experimentales de esta investigación, se ha establecido un rango operativo que fluctúa entre un mínimo de 2,5 cm y un máximo de 3,0 cm, buscando optimizar la distribución de corriente y minimizar la caída de potencial óhmico.

2.2.4.3.Voltaje

La aplicación de corriente continua induce la migración selectiva de cationes hacia el cátodo y aniones hacia el ánodo (EMEW, 2023). El intervalo de trabajo se ha fijado entre 2,0 V y 2,5 V, asegurando el potencial necesario para la reducción del cobre sin activar reacciones secundarias no deseadas.

2.2.4.4.Diseño Factorial

Esta estrategia permite evaluar sistemáticamente el impacto individual y las interacciones entre diversas variables operativas. Según (Kuehl, 2001), el análisis de los efectos entendidos como la variación en la respuesta ante cambios en los factores es esencial para identificar relaciones causales y optimizar la toma de decisiones técnicas.

2.2.4.5.Diseño Factorial 2^k

Este modelo analiza k factores en dos niveles cada uno, requiriendo un total de 2^k corridas experimentales. Su implementación permite detectar simultáneamente efectos principales e interacciones complejas, garantizando una comprensión profunda del fenómeno (Medina Varela, 2011).

Para la ejecución, se utiliza una matriz ortogonal basada en signos «+» y «-» que representan los niveles alto y bajo de cada variable (Fernández Bao, 2020). Al considerar $k=3$ variables, se obtendrá una estructura de 8 combinaciones experimentales que cubren exhaustivamente el espacio de diseño del estudio.

2.3.Definición de términos básicos

Ánodo: Son placas de cobre o plomo que actúan como puntos de entrada para la corriente eléctrica de carga positiva. En el proceso de electroobtención pueden ser de plomo estaño o plomo bismuto ya que experimentan una fuerte corriente eléctrica, lo que les genera un estrés mecánico y gradualmente pierden capas de material anódico que luego se depositan en el fondo de la celda (CODELCO, 2018).

Cátodo: Son placas de acero con carga negativa que en el proceso de electroobtención contienen una alta pureza de cobre, pues son los encargados de atraerlos. Estos cátodos pueden contener una pureza de cobre de hasta 99.9% (CODELCO, 2018).

Voltaje: Constituye una medida de la presión eléctrica que propulsa el desplazamiento de los electrones a lo largo de un conductor eléctrico, orientándolos desde un origen con mayor potencial eléctrico, también denominado voltaje alto, hacia un destino con menor potencial eléctrico, denominado voltaje bajo (IBERDROLA, 2021).

Amperaje: Nos referimos al término que define el flujo de carga eléctrica a que se hace referencia en el contexto de un circuito, cuya magnitud se expresa en amperios (A). Este parámetro representa la cantidad de electrones que transitan por un punto específico de un conductor en un intervalo de tiempo determinado (ENDESA, 2018).

Densidad de corriente: La magnitud en consideración es la cantidad específica de corriente que fluye a través de una unidad de área en un material conductor. Esta magnitud se representa con la letra J y se mide específicamente en unidades de amperios por metro cuadrado (A/m^2) (LIFEDER, 2019).

Ácido sulfúrico: En su estado de pureza, se presenta como un líquido claro y sin color de textura aceitosa. A temperaturas superiores a 30°C, comienza a liberar vapores. Debido a su capacidad de reacción con diversos metales, desempeña un papel importante en el proceso de lixiviación (CODELCO, 2018).

Concentración: Se refiere a la proporción de una especie química disuelta, generalmente un metal, presente en la solución electrolítica utilizada en el proceso (LIPLATA, 2022).

Solución: Es una composición uniforme en la que una o más sustancias (llamadas solutos) están completamente disueltas en un disolvente (CODELCO, 2018).

Espesor: Es el grosor que presenta un sólido, como por ejemplo los ánodos y cátodos presentan un espesor en específico (RAE, 2022).

Recubrimiento: Volver a cubrir algo por completo, como en el caso de los cátodos que se ven recubiertos por el cobre recuperado (RAE, 2022).

Área: Superficie específica que se distingue de lo que lo rodea (RAE, 2022).

Celda electrolítica: Son los contenedores utilizados tanto en el proceso de electro obtención como el de electro refinación para llevar a cabo la electrólisis; albergan la solución que transporta las especies disueltas del metal (CODELCO, 2018).

Solución acuosa: Mezcla homogénea en la que uno o más compuestos conocidos como solutos, y estos están disueltos en agua también conocido como solvente (YUBRAIN, 2020).

Electrodeposición: Este proceso, denominado precipitación mediante reducción electrolítica o electro obtención, permite la recuperación de metales en forma pura y selectiva (CODELCO, 2018).

2.4.Hipótesis de investigación

2.4.1. Hipótesis general

- El tratamiento de soluciones lixiviadas, nos permitirá obtener resultados óptimos de recuperación de cobre mediante el proceso de electrodeposición.

2.4.2. Hipótesis específicas

- La distancia entre ánodo y cátodo, permitirá potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.
- El voltaje, permitirá potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.

- El tiempo, permitirá potenciar la recuperación de cobre a través del proceso de electrodeposición.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.3. Diseño metodológico

El propósito de este estudio es examinar la metodología empleada en el trabajo de investigación titulado «Tratamiento de soluciones lixiviadas para evaluar la recuperación de cobre por electrodeposición». La metodología se ha estructurado en función de la sexta edición de la obra Metodología de la investigación, escrita por Roberto Hernández Sampieri, en donde:

3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación se clasifica como un estudio de carácter aplicado, cuya finalidad reside en la generación de conocimiento susceptible de ser empleado de manera directa en la resolución de problemas inherentes a la sociedad o a la industria. El enfoque predominante se fundamenta en los avances tecnológicos derivados de la investigación fundamental, con un énfasis en establecer conexiones entre la teoría y la práctica, lo que se traduce en la creación de productos innovadores (Hernández, 2014).

3.1.2. Nivel de investigación

La presente investigación se clasifica como un estudio de nivel explicativo, ya que el análisis trasciende la descripción de fenómenos para profundizar en sus causas subyacentes. El objetivo central no es solo observar el proceso de electrodeposición, sino fundamentar los mecanismos físicos y químicos que rigen el sistema. Bajo este enfoque, se busca elucidar las relaciones causales entre las variables operativas y los indicadores de recuperación, permitiendo una comprensión integral de las interacciones que determinan la eficiencia en el tratamiento de soluciones lixiviadas (Hernández, 2014; Marroquín, 2013).

3.1.3. Diseño de investigación

La investigación se adscribe a un paradigma experimental, dado que su ejecución requiere la manipulación técnica y controlada de variables independientes para evaluar su impacto en el sistema. Bajo este enfoque, se establecen relaciones de causalidad donde los parámetros operativos actúan como factores determinantes, mientras que la respuesta obtenida como la eficiencia en la recuperación de cobre constituye la variable dependiente. Esta estructura permite validar empíricamente cómo las modificaciones en las condiciones del proceso condicionan los resultados finales en la celda electrolítica (Hernández, 2014; Arias, 2006; Palella Stracuzzi y Martins Pestana, 2012).

3.1.4. Enfoque de investigación

Este estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, fundamentado en la medición objetiva y precisa de las variables metalúrgicas mediante el razonamiento deductivo. El método se apoya en marcos teóricos consolidados para validar hipótesis operativas, permitiendo establecer patrones de comportamiento del sistema mediante la recolección de datos empíricos. De acuerdo con Hernández (2014) y Borda (2009), este proceso de verificación científica asegura que los resultados obtenidos en la recuperación de cobre sean rigurosos, reproducibles y estadísticamente significativos (Hernández, 2014; Borda, 2009).

3.4. Población y muestra

3.2.1. Población

Solución proveniente de la lixiviación en pilas o columnas de un mineral de cobre, el presente estudio se llevó a cabo en el Centro de Desarrollo Tecnológico de Materiales, un entorno interdisciplinario que reúne conocimientos y avances tecnológicos provenientes de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica.

3.2.2. Muestra

Para la realización de este estudio, se emplearon exactamente dos litros de solución rica obtenida mediante el proceso de la lixiviación en pilas de mineral de cobre. Dicho proceso extractivo fue desarrollado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica. Este entorno académico proporcionó las condiciones controladas requeridas para asegurar la reproducibilidad experimental, permitiendo así estudiar con rigurosidad científica la recuperación del metal y optimizar variables operativas clave para la hidrometalurgia del cobre.

3.4.3. Diseño de la investigación

El presente estudio se ha fundamentado en un diseño factorial 2^3 con dos puntos centrales, con el propósito de optimizar la recuperación de cobre desde soluciones acuosas. La combinación de tres variables operativas en dos niveles permite una evaluación exhaustiva de su impacto tanto individual como conjunto. El propósito de este estudio es verificar la hipótesis concerniente a la linealidad del modelo, a fin de obtener conclusiones precisas que permitan optimizar la eficiencia del proceso de recuperación metálica en condiciones controladas de laboratorio, teniendo en consideración la distancia, tiempo y la concentración del cobre en la solución. Por lo que se tendrá 8 pruebas con dos centrales por lo que se tendrá que realizar 10 pruebas experimentales.

Tabla 1
Variables del estudio

	Men	May	Min	Max	Central
Voltaje (V)	-	+	2.00	2.50	2.25
Distancia (cm)	-	+	2.50	3.00	2.75
Tiempo (min)	-	+	210.00	300.00	255.00

Tabla 2
Pruebas experimentales para la recuperación de cobre por electrodeposición

Nº	X ₁	X ₂	X ₃	Z ₁ (V)	Z ₂ (cm)	Z ₃ (min)
----	----------------	----------------	----------------	--------------------	---------------------	----------------------

1	-	-	-	2.00	2.50	210.00
2	+	-	-	2.50	2.50	210.00
3	-	+	-	2.00	3.00	210.00
4	+	+	-	2.50	3.00	210.00
5	-	-	+	2.00	2.50	300.00
6	+	-	+	2.50	2.50	300.00
7	-	+	+	2.00	3.00	300.00
8	+	+	+	2.50	3.00	300.00
9	0	0	0	2.25	2.75	255.00
10	0	0	0	2.25	2.75	255.00

Como se muestra en la Tabla 2, se presentan las variables del estudio y sus niveles codificados (–, +) y reales: voltaje (2,00–2,50 V), distancia (2,50–3,00 cm) y tiempo (210–300 min), incluyendo el punto central. Tal y como se muestra en la Tabla 3, se expone el diseño factorial 2^3 con ocho corridas y dos réplicas centrales para electrodeposición.

3.5. Técnicas de recolección de datos

3.5.3. Técnicas a emplear

- Observación sistemática directa:** Forma de observación no invasiva para adquirir información sobre la conducta espontánea, esto posibilita una recopilación de datos organizada y rigurosa, lo cual adquiere una relevancia especial en investigaciones cuantitativas (Hernández, 2014).
- Observación sistemática indirecta:** Forma de observación en la que el investigador no observa directamente, sino que utiliza diversos documentos o archivos que contienen información relacionado al tema de investigación (Hernández, 2014).
- Observación experimental:** Mediante esta forma de observación se podrá comprender cómo se llevan a cabo las actividades en el proceso, con el propósito de obtener información que pueda ser procesada más adelante (Hernández, 2014; Rodríguez, 2005).

3.1.5. Descripción de los instrumentos

Con el propósito de registrar y documentar los datos obtenidos durante las pruebas de electrodeposición, se hizo uso de instrumentos de recopilación como la ficha de observación, la lista de cotejo y la libreta de notas. En dichos instrumentos se consignaron las condiciones operativas (voltaje, corriente, tiempo, pH y temperatura), incidencias y observaciones del depósito. Además, se empleó una cámara fotográfica para documentar el montaje experimental y la apariencia del cobre electrolítico, y un ordenador portátil para el almacenamiento, la tabulación y el procesamiento de datos experimentales (Silvestre & Huamán, 2019).

En la recopilación de datos se llevó a cabo utilizando una celda electrolítica de laboratorio equipada con placas de plomo (ánodos) y acero inoxidable 316L/304 (cátodo), que fue alimentada por un rectificador DC (0-12 V; 0-30 A) para monitorear de manera precisa tanto el voltaje como la corriente. El pH del electrolito se midió utilizando un potenciómetro/pH-metro (electrodo de vidrio), mientras que la temperatura se controló mediante la utilización de un termómetro. La cuantificación de Cu en solución barre y en el cobre depositado se realizó por volumetría (titulación) usando bureta, pipetas volumétricas (1 mL) y matraces. Además, se calculó la densidad a partir de la masa y el volumen, utilizando una balanza analítica para garantizar la precisión de los resultados (Mendham et al., 2000; ASTM E70-19, 2024).

3.6. Técnicas para el procedimiento de la información

Las técnicas que se usarán para el procedimiento de información serán mediante proceso manual y electrónico; también será de gran utilidad los programas como Microsoft Word, Power Point y Microsoft Excel para la creación de documentos, tablas, gráficos, procesamiento de datos, presentaciones y resultados estadísticos (Leonard & Kazmier, 2009).

La metodología empleada para el procesamiento de datos se fundamenta en el análisis estadístico, que implica la organización, depuración y examen riguroso de la información recabada en las diez corridas del diseño factorial 2^3 con puntos centrales. En primer lugar, los registros de laboratorio fueron meticulosamente tabularizados en una hoja de cálculo, con el propósito de verificar la consistencia de las unidades y descartar la presencia de valores atípicos evidentes. Posteriormente, se procedió al cálculo de las respuestas: recuperación del cobre (%Cu) a partir de las concentraciones inicial y final del mismo (y/o balance de masa), y calidad del cobre depositado. Para la identificación de la significancia de efectos lineales, interacciones y curvatura ($\alpha = 0,05$), se aplicó la Análisis de la Varianza (ANOVA). Además, se estimó el error experimental con las réplicas del punto central. Una vez finalizado el análisis, se procedió a la elaboración de gráficas de Pareto, superficies de respuesta y contornos. Estos a su vez permitieron interpretar tendencias y definir condiciones operativas que maximizan la recuperación y la calidad (Triola, 2018; Vargas, 1995; Edward & Vieira, 2025).

CAPÍTULO IV

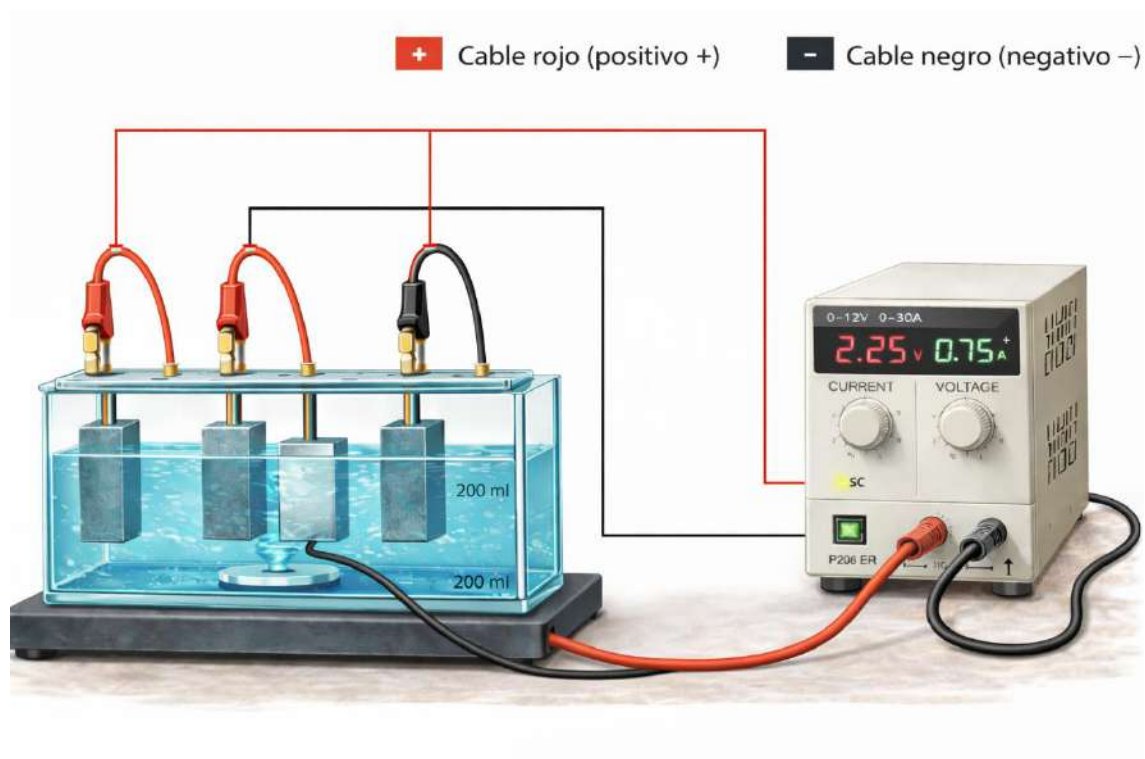
RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Condiciones del experimento

La investigación se llevó a cabo en el compartimiento electrolítico de laboratorio, el cual es un tanque rectangular con dimensiones internas de 18 cm de largo, 6 cm de ancho y 5 cm de alto. Se emplearon fuente de poder con rangos de 0 a 30 voltios y una variación de amperaje entre 0 a 10 amperios para una línea doméstica. El electrolito utilizado en el estudio tenía un volumen de trabajo de 200 mL. El procedimiento de electrodeposición consistió en la implementación de una solución de sulfato de cobre con una concentración inicial de Cu de 1,14 g/L, acidificada con H_2SO_4 a 30 g/L y con un pH de 1,5, con el objetivo de garantizar la conductividad y la estabilidad del sistema. Las pruebas se ejecutaron bajo control electroquímico a 2,25 V y 0,75 A, manteniendo la temperatura en 30 °C. Para ello, se empleó un ánodo de plomo de 2×2 cm como electrodo de trabajo anódico, y un cátodo de acero inoxidable (AISI 316L/304) de 2×2 cm como superficie de depósito. Previamente a cada corrida, los electrodos fueron adecuadamente acondicionados y posicionados con el fin de garantizar la repetibilidad del proceso. Para ello, se llevó a cabo un registro de la respuesta del proceso en términos de calidad porcentual del depósito y de recuperación porcentual de cobre.

Figura 1
Esquema de la celda electrolítica



4.1.2. Resultados de la parte experimental

Después de realizar las pruebas experimentales se realizaron el análisis de la solución por volumetría por método yodométrica (ASTM E478-08, 2017) a las 10 pruebas realizadas por duplicado donde se toma un volumen de 1 mL de solución para el análisis y para la densidad con un picnómetro de 25 mL. El resultado de las pruebas se describe en la tabla 4.

Tabla 3

Análisis químico de la solución barren de la electrodeposición del cobre

Nº	V muestra (cm ³)	Densidad g/cm ³	Peso muestra g	Factor	V gastado cm ³	% Cu
1	1	1.030	1.0300	0.07234567	184.56	12.78
2	1	1.050	1.0500	0.07234567	145.81	9.91
3	1	1.022	1.0220	0.07234567	200.41	13.99
4	1	1.035	1.0350	0.07234567	165.17	11.39
5	1	1.021	1.0210	0.07234567	127.87	8.94
6	1	1.020	1.0200	0.07234567	92.62	6.48
7	1	1.052	1.0520	0.07234567	143.09	9.70
8	1	1.003	1.0030	0.07234567	105.05	7.47
9	1	1.001	1.0010	0.07234567	72.59	5.17
10	1	1.001	1.0010	0.07234567	71.21	5.08

Como se muestra en la Tabla 4, se ha realizado un análisis químico exhaustivo de la solución barren posterior a la electrodeposición de cobre. Para diez ensayos, se registra el volumen de la muestra (1 cm³), su densidad (1,001-1,052 g/cm³) y su peso correspondiente, aplicando un factor constante de tiosulfato de sodio (0,07234567). El cálculo del porcentaje de concentración (Cu %) se realiza mediante la utilización del volumen de titulante consumido, el cual oscila entre 5,08 y 13,99 % en este caso.

Tabla 4*Análisis del cobre electrolítico obtenido de las 10 pruebas*

Nº	Peso g Cu	Factor	Volumen gastado cm ³	% Cu
1	0.0224	0.07134567	28.92	92.10
2	0.0235	0.07134567	30.53	92.70
3	0.0324	0.07134567	41.42	91.20
4	0.0246	0.07134567	31.69	91.90
5	0.0432	0.07134567	56.92	94.00
6	0.0321	0.07134567	42.65	94.80
7	0.0425	0.07134567	55.40	93.00
8	0.0357	0.07134567	46.89	93.70
9	0.0465	0.07134567	60.68	93.10
10	0.0502	0.07134567	65.44	93.00

Como se muestra en el análisis de la Tabla 5, se ha obtenido el cobre electrolítico en 10 pruebas. Se tomo una muestra de cobre electrolítico para el análisis, el peso de Cu oscila entre 0,0224 y 0,0502 gramos, y que el factor constante se mantiene en de la solución de tiosulfato 0,07134567. Además, se ha calculado el volumen gastado de la titulación, que oscila entre 28,92 y 65,44 centímetros cúbicos. El porcentaje de pureza del depósito, expresado como %Cu, evidencia un alto grado de pureza, oscilando entre el 91,20 % y el 94,80 %, con valores consistentemente elevados entre las diferentes corridas.

4.1.3. Desarrollo de los resultados de la investigación

Los resultados obtenidos de las 10 pruebas experimentales en la calidad y recuperación se detallan en la tabla 6 que se describe a continuación.

Tabla 5

Recuperación y calidad de cobre obtenido por electrodeposición

Nº	Z ₁ (V)	Z ₂ (cm)	Z ₃ (min)	Calidad (%Cu)	Recup. (%Cu)
1	2.00	2.50	210.00	92.10	42.25
2	2.50	2.50	210.00	92.70	54.37
3	2.00	3.00	210.00	91.20	37.29
4	2.50	3.00	210.00	91.90	48.32
5	2.00	2.50	300.00	94.00	59.99
6	2.50	2.50	300.00	94.80	71.02
7	2.00	3.00	300.00	93.00	55.22
8	2.50	3.00	300.00	93.70	67.13
9	2.25	2.75	255.00	93.10	77.29
10	2.25	2.75	255.00	93.00	77.72

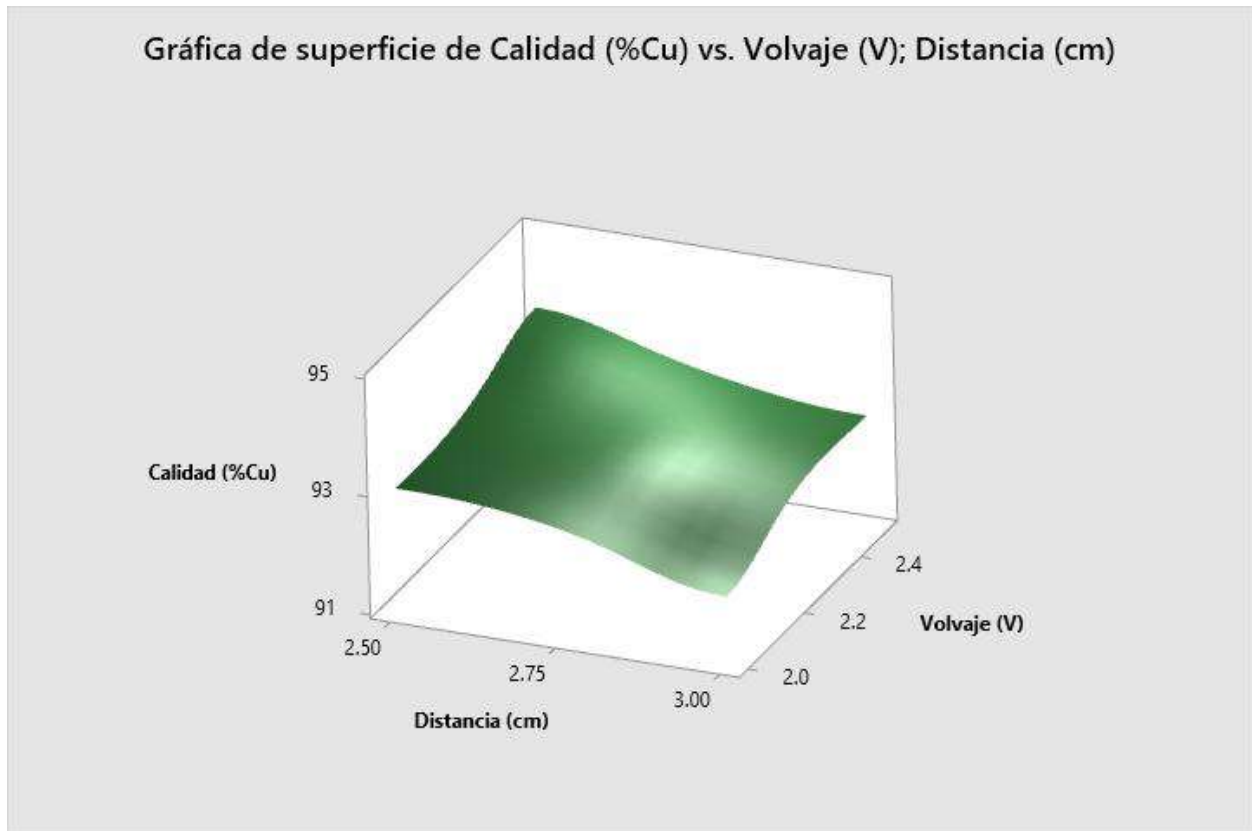
Como se muestra en la Tabla 6. De acuerdo con los resultados obtenidos, las pruebas 10 y 9 han demostrado ser las más eficaces en términos de recuperación, con un 77,72 % y un 77,29 %, respectivamente. Estos resultados se han logrado con una calidad cercana al 93 % Cu. Como se evidencia en el análisis, condiciones intermedias de voltaje y distancia, con tiempo moderado, favorecen un balance entre transferencia de masa y estabilidad del depósito, maximizando el Cu removido sin pérdida marcada de pureza.

En lo que respecta a la calidad, la condición óptima resultó ser la prueba 6 (2,50 V, 2,50 cm, 300 min), lo que dio como resultado un 94,80 % de Cu y una recuperación del 71,02 %. El incremento del voltaje, la reducción de la separación y el aumento del tiempo no solo incrementan la carga transferida, sino que también fomentan la creación de un depósito más compacto y

ordenado. En términos comparativos, si bien recupera ligeramente menos que el centro, ofrece cobre de mayor pureza.

Figura 2

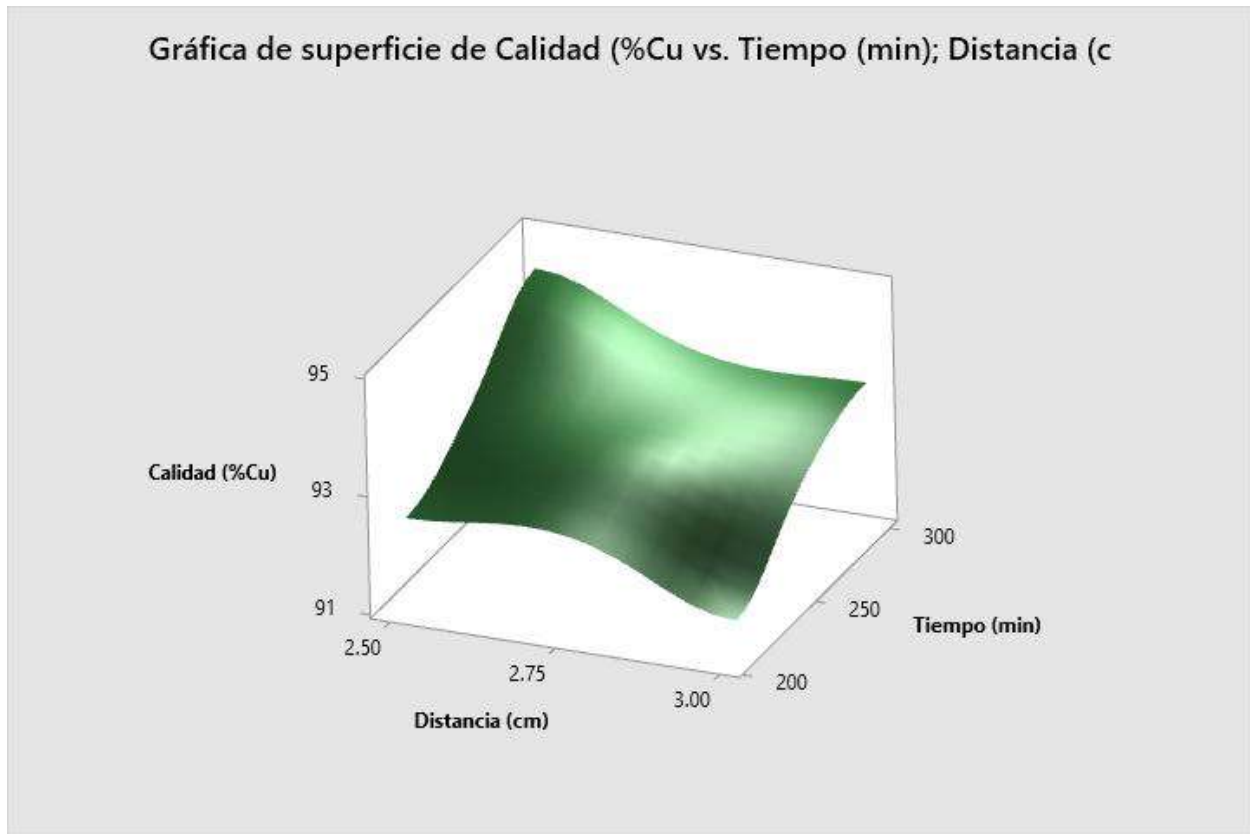
La ley del cobre obtenido por electrolítico en relación de la distancia y voltaje



Como se muestra en la Figura 2, se ha elaborado una gráfica de superficie que establece una correlación entre la calidad del cobre depositado, expresado como el porcentaje de cobre (Cu %), y las variables de voltaje (2,0-2,5 V) y distancia entre electrodos (2,5-3,0 cm). La superficie verde indica valores de calidad entre el 91 % y el 95 %Cu, con una tendencia a aumentar a mayor voltaje y menor distancia, y una ligera depresión en la zona intermedia del diseño experimental.

Figura 3

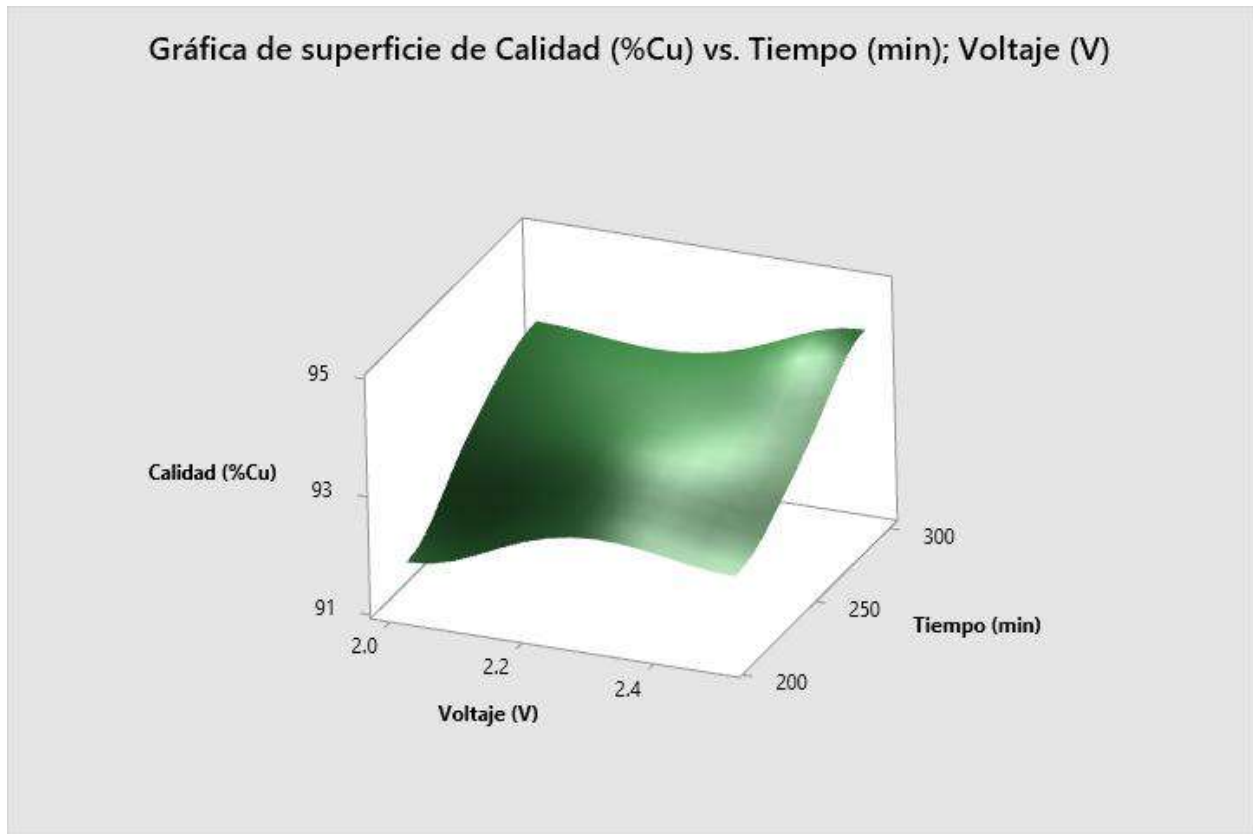
Calidad de cobre obtenido en relación del tiempo y la distancia



Tal y como se muestra en la figura 3 expone los resultados de una investigación que se ha realizado para establecer una correlación entre la calidad del cobre depositado, expresado como el porcentaje de cobre, y el tiempo de electrodeposición. Este parámetro oscila entre 210 y 300 minutos. Asimismo, dicha investigación ha examinado la distancia entre electrodos, que se ha fijado en un rango de entre 2,5 y 3 centímetros. La superficie indica valores aproximados de 91 a 95 %Cu, lo que sugiere una tendencia a incrementar la calidad con el aumento del tiempo y la reducción de la distancia, mientras que a mayores distancias se observa una disminución relativa. Se observa una ligera variación en la zona central, acompañada de una suave depresión.

Figura 4

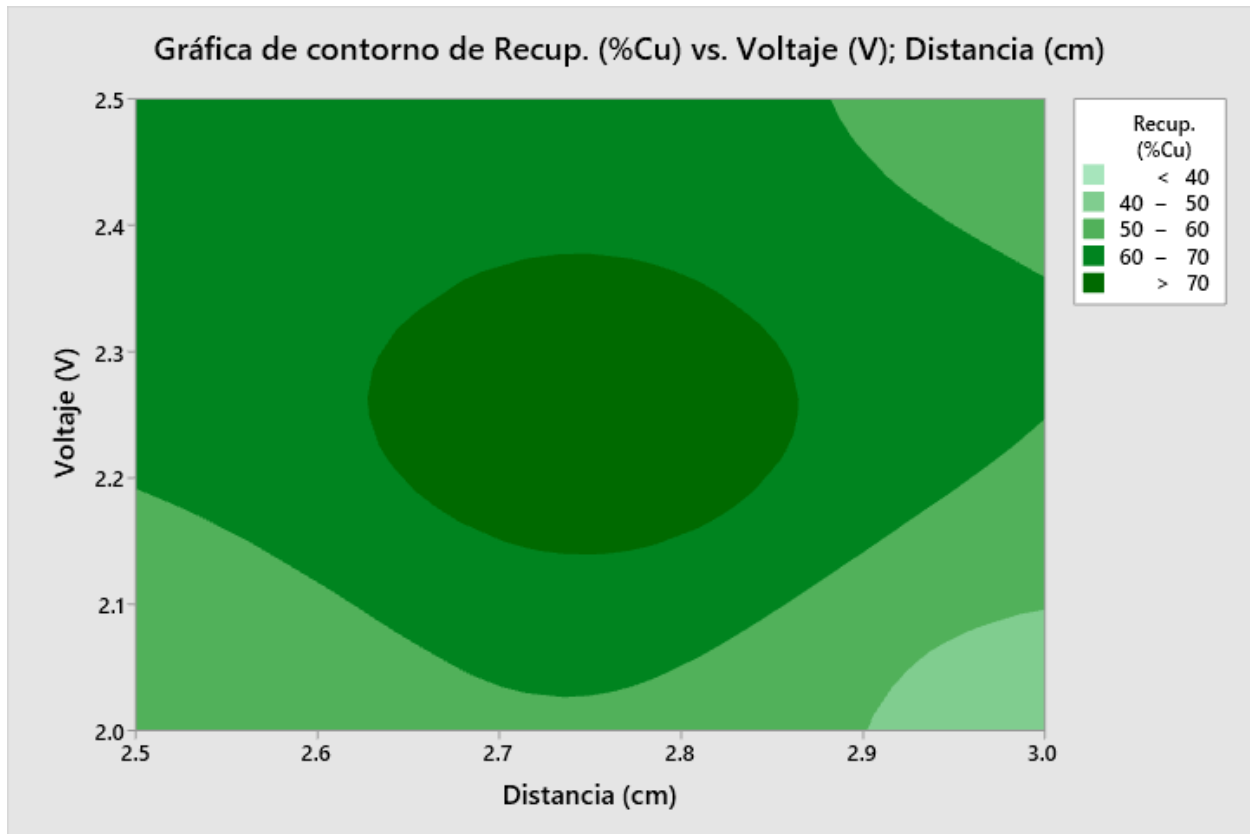
Ley del cobre electrolítico obtenido en relación al voltaje y tiempo



Como se observa en la figura número 4, la calidad del cobre depositado, expresado como porcentaje de cobre (Cu %), presenta una variación según el voltaje (2.0-2.5 V) y el tiempo de electrodeposición (210-300 minutos). La superficie verde representa valores cercanos al 91-95 %Cu, lo que evidencia un incremento gradual de la calidad al aumentar el voltaje y el tiempo. Se ha observado una ligera zona de menor respuesta en condiciones intermedias, lo que sugiere un comportamiento no completamente lineal entre ambos factores.

Figura 5

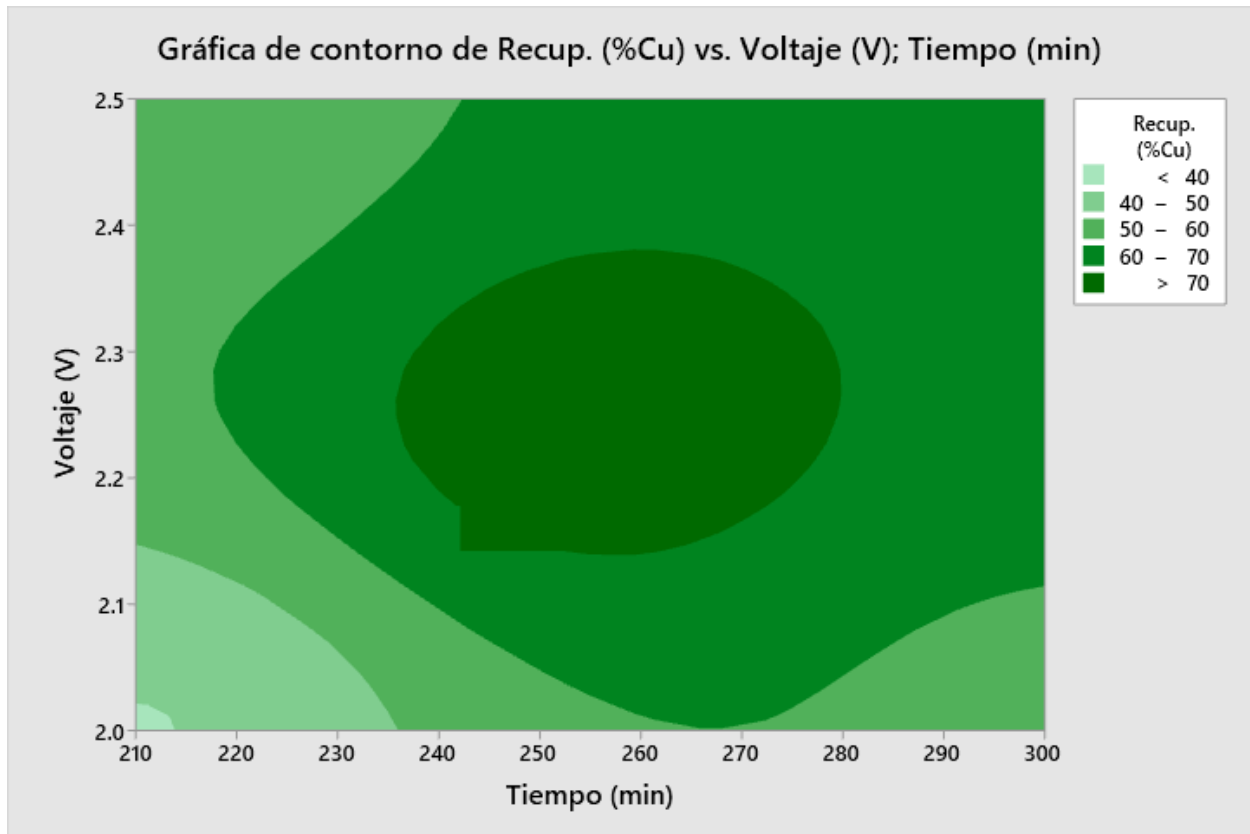
Recuperación por electrodeposición de cobre vs distancia y voltaje



Para una mejor comprensión del tema, véase la Figura 5, la cual muestra una gráfica de contorno de la recuperación de cobre (Cu %) en función del voltaje (2,0-2,5 V) y la distancia entre electrodos (2,5-3,0 cm). Las áreas de menor intensidad luminosa indican recuperaciones más significativas, con un máximo superior al 70 % alrededor de 2,25–2,30 V y 2,7–2,8 cm. En los extremos del rango, es decir, en situaciones de voltajes extremos y distancias muy bajas o altas, la recuperación se reduce a intervalos inferiores al 50-60 %.

Figura 6

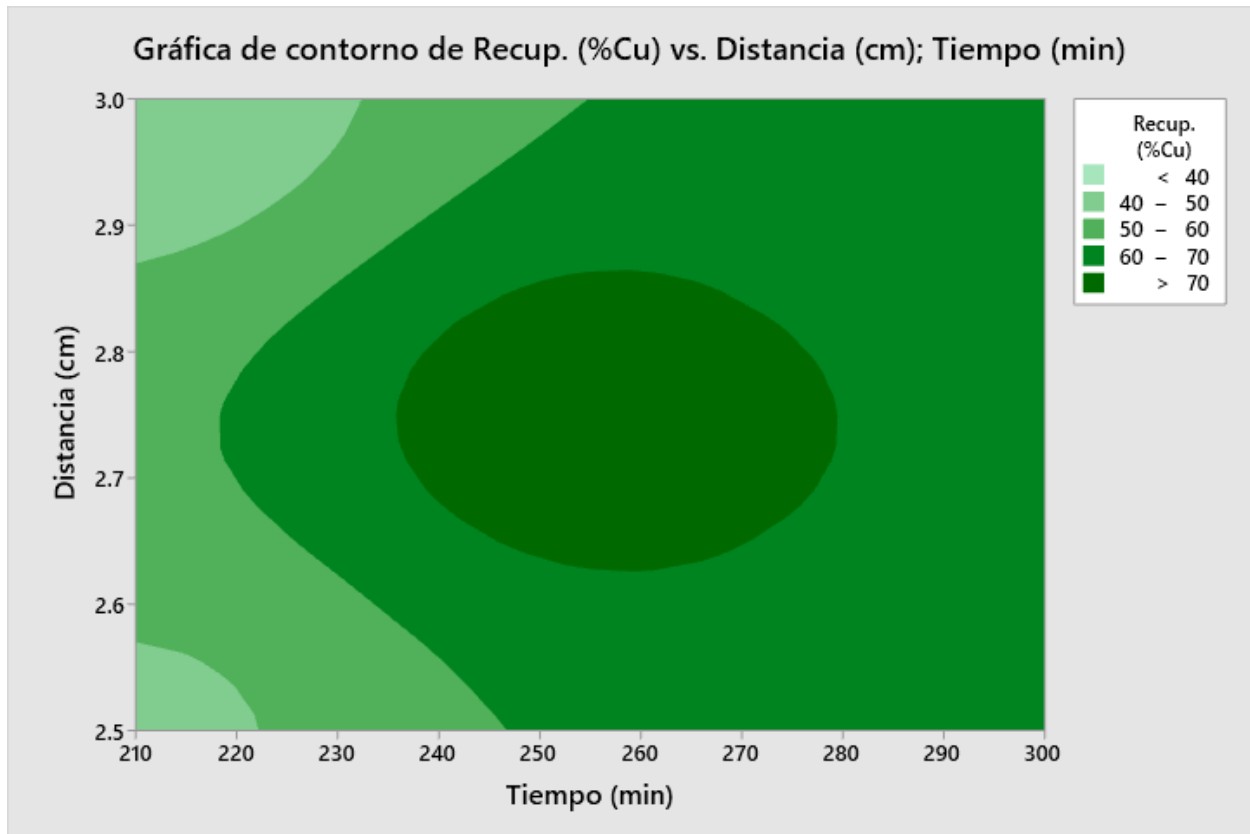
En relación del voltaje y el tiempo la recuperación del cobre por electrodeposición



Como pueden observar en la figura 6, se presenta una gráfica de contorno de la recuperación de cobre (%Cu) en función del voltaje (2.0-2.5 V) y el tiempo (210-300 min). Las áreas de menor intensidad lumínica indican mayores recuperaciones, observándose una zona óptima con un porcentaje >70 % alrededor de 2,2–2,3 V y 24–26 min. En períodos breves (210-220 minutos) y bajo voltajes moderados, la recuperación desciende a niveles inferiores al 50-60 %, lo que evidencia la interacción conjunta de ambos factores.

Figura 7

Recuperación de cobre electrolito en relación de la distancia y tiempo



Como se visualiza en la figura 7, nos encontramos ante una gráfica de contorno de la recuperación de cobre (Cu %) en función de la distancia entre electrodos (2,5-3,0 cm) y el tiempo de electrodeposición (210-300 min). Las tonalidades más oscuras indican recuperaciones significativas, identificándose una zona óptima con un porcentaje >70 % alrededor de 2,7–2,8 cm y 240–280 min. En intervalos de tiempo breves (210-220 minutos) y distancias extremas, la recuperación desciende a niveles inferiores al 50-60 %.

4.2. Contrastación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de hipótesis general

Ha: El tratamiento de soluciones lixiviadas, nos permitirá obtener resultados óptimos de recuperación de cobre mediante el proceso de electrodeposición.

Ho: El tratamiento de soluciones lixiviadas, **no** permitirá obtener resultados óptimos de recuperación de cobre mediante el proceso de electrodeposición.

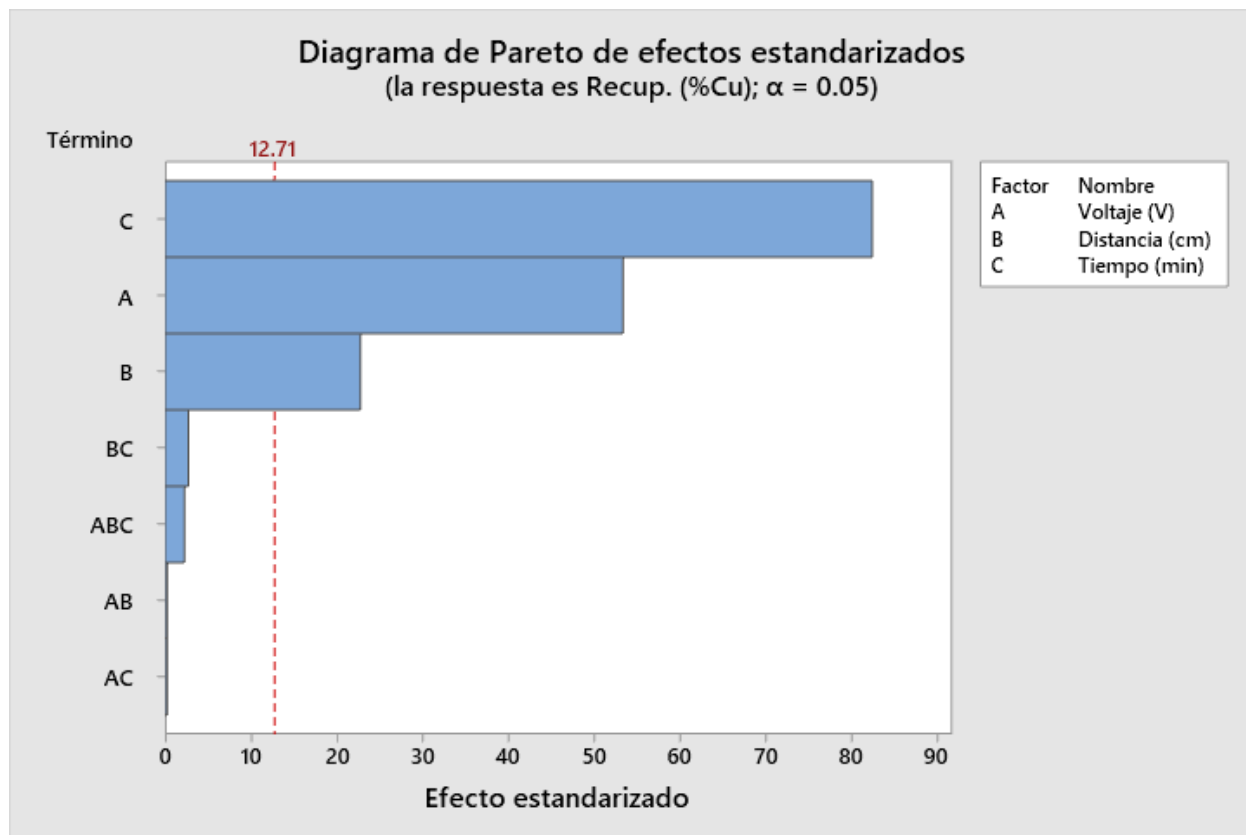
Tabla 6

Análisis de varianza de la recuperación de cobre por electrodeposición

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	84.2522	10.5315	2410.35	0.016
Lineal	8	1797.89	224.737	2410.35	0.016
Volvaje (V)	3	946.35	315.45	3383.27	0.013
Distancia (cm)	1	265.5	265.499	2847.54	0.012
Tiempo (min)	1	48.36	48.364	518.72	0.028
Interacciones de 2 términos	1	632.49	632.486	6783.55	0.008
Volvaje (V)*Distancia (cm)	3	0.71	0.237	2.55	0.425
Volvaje (V)*Tiempo (min)	1	0.01	0.006	0.07	0.838
Distancia (cm)*Tiempo (min)	1	0.01	0.006	0.06	0.842
Interacciones de 3 términos	1	0.7	0.7	7.5	0.223
Volvaje (V)*Distancia (cm)*Tiempo (min)	1	0.49	0.486	5.21	0.263
Curvatura	1	0.49	0.486	5.21	0.263
Error	1	850.35	850.347	9120.16	0.007
Total	1	0.09	0.093		

Figura 8

Diagrama de Pareto de la recuperación de cobre por electrodeposición en relación del voltaje, distancia y tiempo



Como se observa en el diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la recuperación (Figura 8), el factor con mayor influencia es el tiempo (C), seguido del voltaje (A) y, en menor medida, la distancia (B). Estos tres efectos superan la línea crítica 12.71 ($\alpha = 0,05$), por lo que se consideran significativos. Por otro lado, las interacciones AB, AC, BC y ABC no superan el umbral, lo que indica una contribución conjunta limitada entre los factores involucrados.

Como se muestra en la Tabla 7 (ANOVA), el modelo es estadísticamente significativo ($p=0.016$) y el componente lineal también lo es ($p=0.013$). De manera individual, el tiempo ($p=0,008$), el voltaje ($p=0,012$) y la distancia ($p=0,028$) afectan significativamente la recuperación. Tras una meticulosa evaluación, se ha determinado que las interacciones de dos términos ($p=0.425$) y la interacción triple ($p=0.263$) no resultan significativas. Cabe señalar que se ha identificado una

curvatura altamente significativa ($p=0,007$), lo que sugiere que la respuesta no es estrictamente lineal y que el óptimo se ubica cerca del punto central del diseño.

4.2.2. Contrastación de hipótesis específicas

Ha: La distancia entre ánodo y cátodo, permite potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.

Ho: La distancia entre ánodo y cátodo, **no** permite potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.

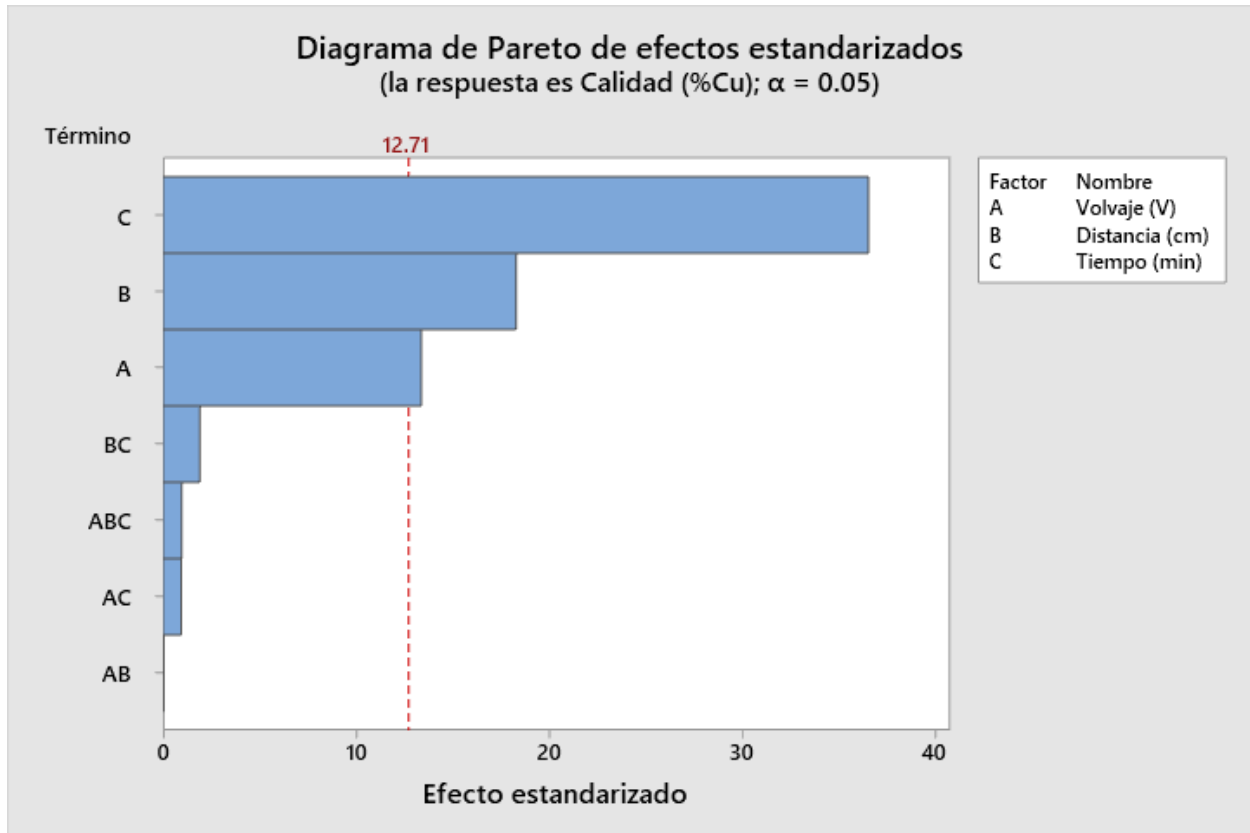
Tabla 7

Análisis de ANOVA de la calidad de cobre por electrodeposición en relación distancia, tiempo y voltaje

Fuente	GL	SC	MC Ajust.	Valor F	Valor p
		Ajust.			
Modelo	8	10.07660	1.2596	232.12	0.051
Lineal	3	10.02180	3.3406	615.61	0.030
Voltaje (V)	1	0.97040	0.9704	178.83	0.048
Distancia (cm)	1	1.81470	1.8147	334.42	0.035
Tiempo (min)	1	7.23670	7.2367	1333.58	0.017
Interacciones de 2 términos	3	0.02450	0.0082	1.50	0.525
Voltaje (V)*Distancia (cm)	1	0.00000	0.0000	0.00	0.975
Voltaje (V)*Tiempo (min)	1	0.00480	0.0048	0.89	0.518
Distancia (cm)*Tiempo (min)	1	0.01960	0.0196	3.62	0.308
Interacciones de 3 términos	1	0.00510	0.0051	0.93	0.511
Voltaje (V)*Distancia (cm)*Tiempo (min)	1	0.00510	0.0051	0.93	0.511
Curvatura	1	0.02520	0.0252	4.65	0.277
Error	1	0.00540	0.0054		
Total	9	10.08200			

Figura 9

Diagrama de Pareto en la calidad de cobre por electrodeposición en relación de voltaje, tiempo y distancia



Según lo indicado por la Tabla 8 (ANOVA), el efecto lineal de la distancia (en centímetros) sobre la calidad porcentual de cobre es estadísticamente significativo ($p = 0.035 < 0.05$), lo que indica que la distancia influye en la pureza del cobre depositado. Además, el diagrama de Pareto (Figura 9) muestra que la distancia (B) supera la línea crítica 12.71 ($\alpha = 0,05$), lo que confirma su relevancia frente a interacciones no significativas. En consecuencia, se rechaza H_0 y se acepta H_a : la distancia ánodo-cátodo sí permite potenciar la calidad del cobre recuperado mediante electrodeposición, dentro del rango evaluado (2,5-3,0 cm).

Ha: El voltaje, permite potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.

Ho: El voltaje, **no** permite potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.

Tras el procesamiento estadístico de los datos, los resultados del \$ANOVA\$ (Tabla 8) confirman que el voltaje ejerce una influencia determinante sobre la pureza del metal obtenido. Con un valor p de 0,048, esta variable se posiciona como un factor crítico, superando el umbral de significancia establecido. Este impacto se visualiza claramente en el Diagrama de Pareto (Figura 9), donde el efecto del potencial eléctrico trasciende la línea crítica de 12.71, validando estadísticamente la aceptación de la hipótesis alterna (H_a) y demostrando que el voltaje optimiza la calidad del cobre en el rango de trabajo evaluado.

Ha: El tiempo, permite potenciar la recuperación de cobre a través del proceso de electrodeposición.

Ho: El tiempo, no permite potenciar la recuperación de cobre a través del proceso de electrodeposición.

En paralelo, el análisis del factor tiempo (Tabla 7) reveló una correlación lineal aún más robusta con la recuperación porcentual, alcanzando un valor p de 0,008. Este parámetro se identifica como la variable de mayor contribución al sistema. En consecuencia, la evidencia permite rechazar la hipótesis nula (H_o) y confirmar que la gestión del tiempo de residencia es esencial para potenciar los índices de recuperación mediante el proceso de electrodeposición.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados.

Los resultados del estudio realizado indican recuperaciones máximas del 97,72 % al 77,29 % (punto central) y calidades de hasta el 94,80 %, lo que confirma la eficiencia del sistema de electrodeposición, aun trabajando con Cu inicial de 1,14 g/L, pH 1,5 y 30 °C. El análisis de la varianza (ANOVA) reveló efectos significativos del tiempo, el voltaje y la distancia sobre la recuperación, así como una curvatura significativa. Esto explica por qué el óptimo se concentra cerca de condiciones intermedias. Este comportamiento resulta coherente con procesos controlados por transporte de masa/difusión, en los que el tiempo incrementa la conversión hasta acercarse al óptimo operacional (Ojeda, 2020).

En comparación con antecedentes nacionales, Aguilar (2021) obtuvo un 72 % de recuperación mediante el uso de una celda de laboratorio a 40 °C y alta densidad de corriente, lo que indica la influencia de las impurezas y la temperatura. En contraste, en este estudio se logró un mayor nivel de recuperación a 30 °C, lo que sugiere un mejor equilibrio en las condiciones eléctricas y geométricas (voltaje, distancia, tiempo). De acuerdo con el estudio realizado por Lizzetti (2021), se trabajó con un rango de voltajes de 1,5 a 1,8 V, con un pH de 1. Se observó que los voltajes más elevados favorecen la formación de óxidos y la disminución de la corriente. Estos hallazgos concuerdan con la observación de que el máximo de recuperación ocurre cerca de 2,25 V, en lugar del voltaje máximo, manteniendo una calidad del depósito adecuada.

En relación con Briones y Linares (2020), quienes alcanzaron un 96,8 % con tiempos de 1 h y corrientes de 1-2 A, los valores máximos de este estudio (95 %) resultan comparables, a pesar de operar con una corriente nominal y una temperatura más bajas. Esto confirma que el

rendimiento depende de la combinación de variables y del diseño de la celda. En el ámbito internacional, si bien Sampayo (2022) y Azpeitia (2022) abordan otros metales y medios (DES o electrodeposición de Sn), ambos coinciden en que la cinética y la calidad del depósito responden fuertemente a condiciones operativas (potencial/temperatura/medio), lo que respalda la interpretación de que, en cobre, el ajuste fino de voltaje, distancia y tiempo determina simultáneamente la recuperación y pureza del metal depositado.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

Tras el análisis llevado a cabo, se concluye que el tratamiento de las soluciones lixiviadas resultó en una recuperación óptima de cobre por electrodeposición, alcanzando un porcentaje de hasta el 77.72 % y una calidad cercana al 95 %Cu. En consecuencia, se acepta la hipótesis general (H_a) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_o).

Tras una consideración exhaustiva de los datos, se concluye que el tiempo de electrodeposición potencia significativamente la recuperación de cobre ($p = 0,008$), lo que confirma la hipótesis planteada para este factor como el de mayor influencia en el modelo.

Se ha determinado que el voltaje incrementa considerablemente la calidad del cobre depositado, lo que implica una aceptación de la hipótesis H y un rechazo de la hipótesis O respecto al efecto del voltaje sobre la pureza del depósito.

Los resultados del estudio concluyen que la distancia entre el ánodo y el cátodo tiene un impacto significativo en la calidad del cobre recuperado ($p = 0.035$), lo que respalda la hipótesis planteada. Además, se evidencia que un control riguroso de esta distancia dentro de los rangos de 2.5 a 3.0 cm contribuye a mejorar la calidad del depósito.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda operar preferentemente cerca del punto óptimo identificado (aproximadamente 2,25 V, 2,75 cm y 250 min) cuando la prioridad sea la maximización de la recuperación. Por otro lado, se sugiere utilizar 2,50 V, 2,50 cm y 300 min cuando se priorice la calidad del depósito.

Es imperativo controlar estrictamente las variables de operación, las cuales deben mantenerse constantes en todo momento. Estas variables son: pH 1.5, H_2SO_4 30 g/L y $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$. Además, es crucial mantener el volumen y la agitación constantes para reducir la variabilidad y garantizar la repetibilidad en las corridas.

Con el propósito de optimizar el montaje electroquímico, es necesario emplear dos ánodos de plomo en los extremos y situar el cátodo en el centro, asegurando la distancia mediante un soporte graduado. Asimismo, es fundamental estandarizar la limpieza y el acondicionamiento de los electrodos antes de cada prueba.

En trabajos futuros, se evaluarán rangos adicionales y variables críticas no incluidas (por ejemplo, densidad de corriente/área del cátodo, temperatura 35-55 $^\circ\text{C}$ e impurezas como Fe) y se aplicará un diseño de superficie de respuesta para refinar el óptimo y mejorar la calidad y la recuperación.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS

7.1.Referencias bibliográficas

Agencia de Sostenibilidad Energética. (s.f.). *Energía en Minería*. (A. d. Energética, Editor)

Energía en Minería: <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/extraccion-por-solventes/>

Aguilar Romero, R. A. (2021). *Diseño de una celda para la electrodeposición de cobre a nivel laboratorio*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Huacho: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.

Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación introducción a la metodología científica*. Caracas: Editorial Episteme.

ASTM E478-08. (2017). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Copper Alloys.

<https://store.astm.org/e0478-08r17.html>

ASTM E70-19. (2024). *Standard Test Method for pH of Aqueous Solutions With the Glass Electrode*. https://store.astm.org/e0070-19.html?utm_source=chatgpt.com

Atlas weather. (2025). *Pronóstico del tiempo para hoy Huacho, Perú*. <https://www.weather-atlas.com/es/peru/huacho>

Azpeitia, L. A. (2022). *Estudio de la electrodeposición de estaño para el desarrollo de ánodos para baterías ion litio*. Universidad Nacional de La Plata. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

Borda, M. (2009). *Metodos Cuantativos Herramientas para la Investigacion en Salud*. Colombia: Uninorte.

https://www.google.com.pe/books/edition/Metodos_Cuantativos_Herramientas_para_la/sbq0rOeXqEcC?hl=es&gbpv=1

Briones Castañeda, J. J., & Linares Chilón, N. N. (2020). *Recuperación de cobre a partir de la malaquita mediante la electrodeposición en el caserio El Tingo, distrito de Hualgayoc, Cajamarca - 2020*. Universidad Privada del Norte. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.

Brown, T., LeMay, E., Bursten, B., & Burdge, J. (2004). *Química: la Ciencia Central*. Pearson Educación.

https://www.google.com.pe/books/edition/Quimica_la_Ciencia_Central/jbNCBpVwE9AC?hl=es-419&gbpv=0

Centeno Cuba, C. B. (2016). *Electroobtención del cobre empleando el método electrodialítico reactivo*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.

<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4623/Zenteno%20Cuba.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CODELCO. (2018). *Codelco Educa*. (C. Chile, Editor) Codelco Educa:

<https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/glosario.html>

CODELCO. (2019). Codelco Educa. *Lixiviación*. Santiago, Chile: Codelco Chile.

https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf

CODELCO. (2019). Codelco Educa. *Electroobtención*. Santiago: Codelco Chile.

https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004/electroobtencion_media_t_cnico_060119.pdf

EcuRed. (s.f.). Ácido nítrico. https://www.ecured.cu/%C3%81cido_n%C3%adtrico

Edward, T., & Vieira, J. (2025). *Introducción a la estadística aplicada*. Taylor y Francis.

https://www.google.com.pe/books/edition/An_Introduction_to_Applied_Statistics/sv9gEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0

EMEW. (2023). Emew clean technologies. *Electrodeposición 101: ¿Qué es la electrodeposición?*

España: Emew corporation. Emew clean technologies.

ENDESA. (21 de Mayo de 2018). *Endesa*. Endesa: <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/electrodomesticos/voltios-vatios-amperios>

Fernández Bao, S. (2020). *Diseño de experimentos: Diseño Factorial*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1

google earth. (2025). *Proyecto*. <https://earth.google.com/web/search/unjfsc/@-11.1274815,-77.60627647,78.96018602a,2104.55364957d,34.99999924y,0h,0t,0r/data=CiwiJgokCQ-wVmHrQDRAEQ-wVmHrQDTAGSEfwymjQktAISEfwymjQkvAQgIIATIpCicKJQohMUdWTzBjT3ZXcEsxanVWY2ZmaVgzY05uNHBROXBfUjBiIAE6AwoBMEICCAB>

Hannula, P., Khalid, M., Janas, D., Janas, K., & Lundström, M. (2019). Energy efficient copper electrowinning and direct deposition on carbon nanotube film from industrial wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 207(10), 1033-1039.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.097>

Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (sexta ed.). México D.F., Santa Fe, Mexico: Mc Graw Hill.

<https://academia.utp.edu.co/grupobasicoclinicayaplicadas/files/2013/06/Metodolog%C3%ADa-de-la-Investigaci%C3%B3n.pdf>

IBERDROLA. (11 de mayo de 2021). *Iberdrola*. Iberdrola:

<https://www.iberdrola.es/blog/luz/que-es-voltaje-electrico-como-medirlo#:~:text=El%20voltaje%20se%20define%20como,o%20diferencia%20de%20potencial%20el%C3%A9ctrica.>

Instituto de Hidrología, Metrológica y Estudios Ambientales. (s.f.). Ácido clorhídrico.

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia2.pdf>

Instituto Tecnológico Geominero de España. (1991). *Minería química*. España: ITGE.

Jiménez, H. (30 de marzo de 2011). Fundación para el Desarrollo y la Tecnología en el Estado

Bolívar Venezuela. *Influencia de los parámetros de electrodeposición en la resistencia a la corrosión de recubrimientos Sn-Ni*, 6. Bolívar, Venezuela: Universidad Nororiental Privada Gran Mariscal de Ayacucho.

<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/7981/Influencia%20de%20los%20par%C3%A1metros%20de%20electrodeposici%C3%B3n.pdf>

Kuehl, R. O. (2001). *Diseño de experimentos: Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones*, 2. Mexico: Thomson Learning.

Leonard, J., & Kazmier. (2009). *Esquema de estadísticas empresariales de Schaum, cuarta edición*. McGraw Hill LLC.

https://www.google.com.pe/books/edition/Schaum_s_Outline_of_Business_Statistics/dkL-hJAYzSwC?hl=es-419&gbpv=0

LIFEDER. (2019). *Lifeder*. Lifeder: <https://www.lifeder.com/densidad-corriente/>

LIPLATA. (15 de junio de 2022). *Liplata*. Liplata: <https://www.liplata.com/que-es-la-concentracion-quimica/>

Lizzetti Diaz, I. A. (2021). *Recuperación de cobre a partir de soluciones lixiviadas mediante electrodeposición*. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Huacho: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.

MAHA ICMI. (03 de 10 de 2017). Proyectos de ingeniería. *Extracción por Solventes*, 88. Chile: ICMI - ingeniería. <https://library.co/article/agentes-lixiviantes-%C3%A1cidos-y-b%C3%A1sicos-en-la-lixiviación-y-extracción-de-cobre#:~:text=Los%20agentes%20lixiviantes%20pueden%20ser%20%C3%A1cidos%20o%20b%C3%A1sicos.,la%20soda%20o%20c%C3%A1ustica%20y%20sulfuros%20y%20el%20cianuro.>

Marroquín, R. (2013). Metodología de la investigación. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.une.edu.pe/Titulacion/2013/exposicion/SESSION-4-METODOLOGIA%20DE%20LA%20INVESTIGACION.pdf>

Media Group SPA. (01 de marzo de 2010). Minería chilena. *30 años haciendo historia*. Santiago, Chile: B2B Media Group SPA. <https://www.mch.cl/reportajes/30-anos-haciendo-historia/#>

Medina Varela, P. D. (2011). *Análisis crítico del diseño factorial 2K sobre casos aplicados*. Scietia Et Technica. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84921327018.pdf>

Mendham, J., Jeffery, G., & A, V. (2000). *Manual de Vogel para el análisis químico cuantitativo*. Harlow Inglaterra:: Prentice Hall. https://elib.must.ac.ug/bib/5320?utm_source=chatgpt.com

MinerAndina. (2022). Minerandina Comunicaciones. *Perú Cobre 2022*. Perú: Minera Antamina.

<https://minerandina.com/wp-content/uploads/2022/04/Peru-Cobre-2022.pdf>

Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.

https://books.google.com.pe/books/about/Design_and_Analysis_of_Experiments.html?id=xJBEDwAAQBAJ&redir_esc=y

Ojeda Villegas, S. D. (2020). *Estudio electroquímico de la electrodeposición de oro y telurio de soluciones de cianuración*. Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas: Universidad Autónoma de Zacatecas.

Palella Stracuzzi, S., & Martins Pestana, F. (2012). *Metodología de la investigación cuantitativa*. Caracas: FEDUPEL.

Panda, B., & S, D. (2001). Electrowinning of copper from sulfate electrolyte in presence of sulfurous acid. *Hydrometallurgy*, 59(1), 55-67.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00140-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00140-7)

Portal Minero S.A. (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia* (Digital ed.). Santiago, Chile: Portal Minero Ediciones.

RAE. (2022). *Real Academia Española*. Real Academia Española: <https://dle.rae.es/espesor>

Rodríguez, E. (2005). *Metodología de la Investigación*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

https://www.google.com.pe/books/edition/Metodolog%C3%ADa_de_la_Investigaci%C3%B3n/r4yrEW9Jhe0C?hl=es-419&gbpv=0

Route One Americas. (01 de diciembre de 2020). Minería Pan-Americana. *Perú: En Mina Justa se realizará la lixiviación de cobre más rápida del mundo*. <https://www.mineria->

pa.com/noticias/peru-en-mina-justa-se-realizara-la-lixiviacion-de-cobre-mas-rapida-del-mundo/

Sampayo Garrido, A. A. (2022). *Recuperación electroquímica de metales a partir de baterías de iones de litio de desecho empleando como medio lixivante Disolventes Eutécticos Profundos (DES)*. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

San Martin, R., Otero, A., & Cruz, A. (2005). Use of quillaja saponins (Quillaja saponaria Molina) to control acid mist in copper electrowinning processes: Part 2: pilot plant and industrial scale evaluation. *Hydrometallurgy*, 77(3-4), 171-181.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.11.006>

Silvestre, I., & Huamán, C. (2019). *Pasos para elaborar la investigación y la redacción de la tesis universitaria*. Editorial San Marcos .

Simpson, J. (2003). *Introducción a la metalurgia*. Universidad de Santiago de Chile. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.

Triola, M. (2018). *Estadística* (13th ed. ed.). Pearson.
https://www.academia.edu/44390569/Estadistica_Mario_F_Triola_12ED

UNJFSC. (2024). *Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión*.
https://www.gob.pe/unjfsc?utm_source=chatgpt.com

Vargas, A. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. Universidad de Castilla-La Mancha.
https://www.google.com.pe/books/edition/Estad%C3%ADstica_descriptiva_e_inferencia_l/RbaC-wPWqjsC?hl=es-419&gbpv=1&dq=estadistica+descriptiva+e+inferencial&pg=PA33&printsec=frontcover

Young, C., Dunne, R., & Kawatra, S. (2019). *SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Incorporated.

https://www.google.com.pe/books/edition/SME_Mineral_Processing_and_Extractive_Me/4hKGDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0

YUBRAIN. (30 de diciembre de 2020). *YuBrain*. YuBrain:

<https://www.yubrain.com/ciencia/quimica/que-es-una-solucion-acuosa-quimica/>

ANEXOS

Anexo 1 Ubicación Geográfica de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión



Anexo 2 Matriz de Consistencia

	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Metodología
Generales	¿En qué medida el tratamiento de soluciones lixiviadas influye en la recuperación de cobre por el proceso de electrodeposición?	Evaluar la influencia del tratamiento de soluciones lixiviadas sobre la recuperación de cobre por el proceso de electrodeposición	El tratamiento de soluciones lixiviadas, nos permitirá obtener resultados óptimos de recuperación de cobre mediante el proceso de electrodeposición.	<u>Independiente</u> • Tratamiento de soluciones lixiviadas <u>Dependiente.</u> Recuperación de cobre por electrodeposición.	<u>Tipo de investigación:</u> Aplicada <u>Nivel de Investigación:</u> Explicativa
	¿En qué medida influencia la distancia entre ánodo y cátodo sobre la calidad de cobre recuperado mediante el proceso de electrodeposición?	Determinar la influencia de la distancia entre ánodo y cátodo sobre la calidad de cobre recuperado por el proceso de electrodeposición	La distancia entre ánodo y cátodo, permitirá potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.	<u>Independiente</u> - Distancia <u>Dependiente.</u> - Calidad	<u>Diseño de Investigación:</u> Experimental <u>Enfoque de Investigación:</u> Mixto
Específico	¿En qué medida influencia el voltaje sobre la calidad de cobre recuperado mediante el proceso de electrodeposición?	Determinar la influencia del voltaje sobre la calidad de cobre recuperado por el proceso de electrodeposición	El voltaje, permitirá potenciar la calidad de cobre recuperado a través del proceso de electrodeposición.	<u>Independiente</u> - Voltaje <u>Dependiente.</u> - Recuperación	<u>Población</u> <u>Muestra:</u> 2 litros de solución <u>Técnica Recolección</u> <u>Datos:</u> Observación
	¿En qué medida influencia el tiempo sobre la recuperación de cobre mediante el proceso de electrodeposición?	Determinar la influencia de la distancia entre ánodo y cátodo sobre la recuperación de cobre por el proceso de electrodeposición.	El tiempo, permitirá potenciar la recuperación de cobre a través del proceso de electrodeposición.	<u>Independiente</u> - Tiempo <u>Dependiente.</u> - Recuperación	<u>Técnica Procesamiento</u> <u>Información:</u> Estadístico

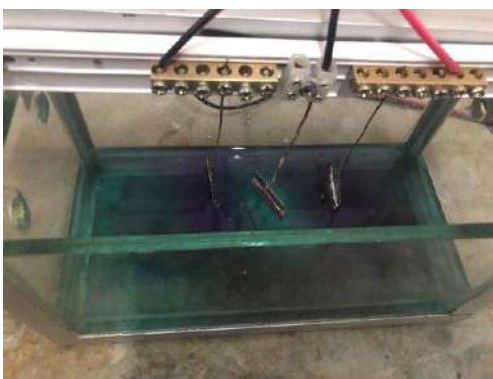
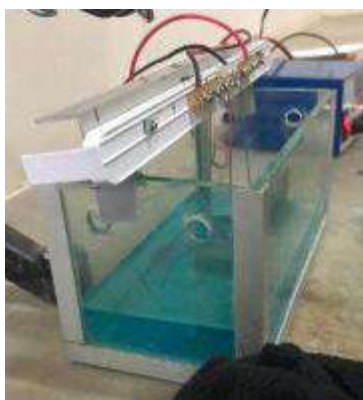
Anexo 3 Condiciones y análisis de solución barren

H2SO4	30 g/L								
pH	1.5								
Voltaje	2.25 V								
I	0.75 A								
T	30 °C								
C(Cu)	5.34 g/L	(5 - 20)		Factor	0.0723457				
Vol.	200 mL								
Anodo	2x2 cm	Plomo							
Catodo	2x2 cm	Acero inoxidable 316L 304							
Peso Cu	1.068 g								
N°	V muestra (cm ³)	Densidad g/cm ³	Peso muestra g	Factor	V gastado cm ³	% Cu	Peso Cu g	% Cu Sol.	Recup. %Cu
1	1	1.030	1.0300	0.07234567	184.56	12.96	0.1335	12.50	87.50
2	1	1.050	1.0500	0.07234567	145.81	10.05	0.1055	9.88	90.12
3	1	1.022	1.0220	0.07234567	200.41	14.19	0.1450	13.58	86.42
4	1	1.035	1.0350	0.07234567	165.17	11.55	0.1195	11.19	88.81
5	1	1.021	1.0210	0.07234567	127.87	9.06	0.0925	8.66	91.34
6	1	1.020	1.0200	0.07234567	92.62	6.57	0.0670	6.27	93.73
7	1	1.052	1.0520	0.07234567	143.09	9.84	0.1035	9.69	90.31
8	1	1.003	1.0030	0.07234567	105.05	7.58	0.0760	7.12	92.88
9	1	1.001	1.0010	0.07234567	72.59	5.25	0.0525	4.92	95.08
10	1	1.001	1.0010	0.07234567	71.21	5.15	0.0515	4.82	95.18

Anexo 4 Análisis de cobre electropositado

N°	Peso g Cu	Factor	Volumen cm ³	% Cu
1	0.0224	0.07134567	28.92	92.10
2	0.0235	0.07134567	30.53	92.70
3	0.0324	0.07134567	41.42	91.20
4	0.0246	0.07134567	31.69	91.90
5	0.0432	0.07134567	56.92	94.00
6	0.0321	0.07134567	42.65	94.80
7	0.0425	0.07134567	55.40	93.00
8	0.0357	0.07134567	46.89	93.70
9	0.0465	0.07134567	60.68	93.10
10	0.0502	0.07134567	65.44	93.00

Anexo 5 Electrodeposición de cobre



Anexo 6 Peso de la lámina de acero sin y con cobre depositado



Anexo 7 Cobre precipitado en el microscopio

