

# Universidad Nacional De Ingeniería

Facultad de Ingeniería Química y Textil



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

## Supervisión de los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición de cobre

Para obtener el título profesional de Ingeniero Químico

Elaborado por:

Eduardo Arturo Mateo Chepe

 [0009-0004-7545-4354](https://orcid.org/0009-0004-7545-4354)

Asesor

Freddy Vicente Huayta Socantaype

 [0000-0002-3732-731X](https://orcid.org/0000-0002-3732-731X)

TOMO I DE I

LIMA - PERÚ

2023

---

Citar/How to cite	Mateo Chepe [1]
Referencia/Reference	[1] E. Mateo Chepe, “ <i>Supervisión de los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición de cobre</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---

---

Citar/How to cite	(Mateo, 2023)
Referencia/Reference	Mateo, E. (2023). <i>Supervisión de los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición de cobre</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

***Dedicatoria***

*El presente trabajo va dedicado a todas aquellas personas que han contribuido a mi crecimiento profesional en las empresas en las que he laborado, cuyos consejos me han servido para llegar hasta donde estoy ahora.*

**Agradecimientos**

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería y a la Facultad de Ingeniería Química y Textil, quienes me dieron las bases necesarias para formarme como profesional.

## Resumen

El objetivo del presente informe es la presentación de las funciones relacionadas con la supervisión de los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición de cobre, con la finalidad de obtener las mejores eficiencias de recuperación, transferencia y electrodeposición en cada etapa.

En la etapa de lixiviación, para asegurar una buena eficiencia de recuperación, se realizaron pruebas para determinar la cinética de lixiviación de cada mineral a lixiviar, de tal manera que se pueda decidir las proporciones de mezcla entre ellos. Como agente lixivante, se utilizó la solución de planta, que consiste en una mezcla de agua de mar y ácido sulfúrico a una concentración de 10 g/l; obteniendo como resultado que los minerales catalogados como OXI A y C presentan una baja cinética de lixiviación, y deben ser mezclados con los minerales catalogados como OXI B y D, las proporciones aún son objeto de estudio durante la redacción del presente trabajo.

En la etapa de extracción por solventes, para asegurar una buena eficiencia de extracción, se analizó la solución orgánica y agregó reactivo extractante para variar su concentración, desde 15.6% a 26.1% v/v a lo largo del año 2022, esto de acuerdo con la concentración de cobre presente en la solución de lixiviación o PLS por sus siglas en inglés (pregnant leaching solution) durante la etapa de inicio de operaciones hasta llegar a los valores de diseño.

Palabras clave – Lixiviación, extracción por solventes, electrodeposición, cobre.

## Abstract

The objective of this report is the presentation of the functions related to the supervision of the copper leaching, solvent extraction and electrodeposition processes, in order to obtain the best recovery, transfer and electrodeposition efficiencies at each stage.

In the leaching stage, to ensure good recovery efficiency, tests were performed to determine the leaching kinetics of each mineral to be leached, so that the mixing proportions between them can be decided. As leaching agent, the plant raffinate solution was used, which consists of a mixture of seawater and sulfuric acid at a concentration of 10 g/l; obtaining as a result that minerals cataloged as OXI A and C present a low leaching kinetics and must be mixed with the minerals cataloged as OXI B and D; the proportions are still under study during the writing of this work.

In the solvent extraction stage, to ensure good extraction efficiency, the organic solution was analyzed and extracting reagent was added to vary its concentration, from 15.6% to 26.1% v/v along the year 2022, this according to the concentration of copper present in the pregnant leaching solution (PLS) during the start-up stage of operations until reaching the design values.

Keywords – Leaching, solvent extraction, electrowinning, copper.

## Tabla de Contenido

	pag
Resumen .....	iii
Abstract .....	iv
Capítulo I: Datos generales de la empresa donde laboró como bachiller realizando trabajos de su especialidad .....	1
1.1. Actividad Principal .....	1
1.2. Sector industrial al que pertenece .....	1
1.3. Líneas de productos .....	3
1.4. Filosofía administrativa .....	3
1.4.1. Visión .....	3
1.4.2. Misión .....	3
1.4.3. Valores .....	4
1.4.4. Políticas .....	4
1.5. Cultura organizacional .....	5
1.6. Estructura funcional (Organigrama) .....	6
1.7. Normatividad empresarial .....	7
1.8. Principios de calidad .....	7
1.9. Sistema de seguridad industrial .....	7
1.10. Gestión de impactos ambientales .....	8
Capítulo II. Cargos y funciones desarrolladas como bachiller .....	10
2.1. Contexto laboral .....	10
2.2. Descripción de cargos y funciones .....	10
2.3. Responsabilidades señaladas en el Manual de Organización y Funciones, ROF, TUPA, u otros documentos de la normatividad empresarial .....	11
2.4. Personal a su cargo y sus responsabilidades .....	12

2.5. Funciones ejecutivas y/o administrativa.....	12
2.6. Cronograma de realización de las actividades.....	14
Capítulo III. Desarrollo de la actividad técnica y aplicación profesional.....	16
3.1. Contexto laboral en el área de trabajo .....	16
3.1.1. Labores y tareas relacionadas con el tema específico a desarrollar.....	16
3.1.2. Conocimientos técnicos de su especialidad requeridos para el cumplimiento de sus labores y tareas.....	16
3.1.3. Participación en actividades complementarias (Investigación, diseño de negocios, Proyectos de innovación, Estandarización de Normas de Calidad, Implementación de Sistemas de Seguridad u otros).....	18
3.2. Hechos relevantes de la actividad técnica .....	18
3.2.1. Descripción de la realidad problemática.....	18
3.2.2. Definición del problema general y secundarios .....	19
3.2.3. Justificación e importancia .....	20
3.2.4. Antecedentes nacionales e internacionales.....	20
3.2.5. Objetivo general y específico .....	24
3.3. Marco conceptual y teórico de los conocimientos técnicos requeridos .....	25
3.3.1. Etapa de lixiviación .....	25
3.3.2. Etapa de extracción por solventes .....	29
3.3.3. Etapa de electrodeposición .....	44
3.4. Propuesta y contribuciones de su formación profesional .....	51
3.4.1. Objetivos y justificación del uso de las técnicas propuestas.....	51
3.4.2. Cálculo y determinaciones de indicadores de gestión para evaluar y monitorear la propuesta.....	51
3.4.3. Análisis e interpretación de resultados y aportes técnicos de la propuesta de solución .....	60
3.4.4. Evaluaciones y decisiones tomadas.....	68
3.4.5. Informes o reportes presentado como resultado de las actividades realizadas.....	69



Capítulo IV. Discusión de resultados e implicancias .....	70
4.1. Contribuciones al desarrollo de la empresa .....	70
4.2. Impacto de la propuesta .....	70
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	71
5.1. Conclusiones.....	71
5.2. Recomendaciones.....	71
Capítulo VI. Referencia Bibliográfica .....	72
Anexos .....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

	pag
Figura 1: Mapa de la ubicación de la empresa Marcobre S.A.C.....	2
Figura 2: Ubicación de la planta de producción de Marcobre.....	3
Figura 3: Organigrama de la gerencia de operaciones de la empresa Marcobre S.A.C. ...	6
Figura 4: Diagrama de etapas del proceso de hidrometalurgia del cobre.....	25
Figura 5: Efecto del pH sobre la lixiviación de minerales de óxidos de cobre.....	26
Figura 6: Efecto del tiempo sobre la lixiviación de minerales de óxidos de cobre.....	27
Figura 7: Metal extraído en función del pH de la solución acuosa.....	29
Figura 8: Agitador-sedimentador convencional .....	33
Figura 9: Crudo formado en la etapa de extracción por solventes .....	34
Figura 10: Representación de continuidad orgánica y acuosa .....	35
Figura 11: Isotherma de extracción.....	37
Figura 12: Isotherma de reextracción.....	38
Figura 13: Esquema del sentido de la reacción (extracción-reextracción) en función del pH .....	39
Figura 14: Efecto de la concentración de extractante.....	41
Figura 15: Efecto del pH en el PLS .....	42
Figura 16: Efecto de la concentración de ácido en el electrolito pobre .....	43
Figura 17: Efecto del descenso de relación O/A en el orgánico transferido.....	44
Figura 18: Diseño de una celda de electrodeposición .....	47
Figura 19: Ánodo comercial de Pb-Ca-Sn.....	48
Figura 20: Cátodo de acero inoxidable .....	49
Figura 21: Diagrama de extracción por solventes .....	55
Figura 22: Diagrama McCabe Thiele de la etapa de extracción .....	56
Figura 23: Diagrama McCabe Thiele para la etapa de re-extracción.....	57

Figura 24: Cinética de lixiviación - OXI A .....	64
Figura 25: Cinética de lixiviación - OXI B .....	64
Figura 26: Cinética de lixiviación - OXI C .....	65
Figura 27: Cinética de lixiviación - OXI D .....	65
Figura 28: Cinética de lixiviación de OXI D ajustada .....	66
Figura 29: Incremento de la concentración de cobre en el PLS durante el 2022.....	67
Figura 30: Incremento del porcentaje de extractante en el orgánico durante el 2022.....	67

**ÍNDICE DE TABLAS**

	pag
Tabla 1: Datos de la empresa Marcobre S.A.C. ....	1
Tabla 2: Actividades desarrolladas como bachiller.....	15
Tabla 3: Producción de cátodos de cobre a nivel mundial .....	24
Tabla 4: Cobre total transferido por el PLS .....	53
Tabla 5: Cobre neto transferido por la SX.....	53
Tabla 6: Masa de cobre electrodepositado .....	54
Tabla 7: Análisis químico del mineral de cabeza ingresado al sistema .....	59
Tabla 8: Análisis químico de los rípios .....	59
Tabla 9: Resultados de lixiviación de una batea .....	61
Tabla 10: Ley de cabeza del mineral estudiado .....	62
Tabla 11: Ley de rípios del mineral estudiado .....	62
Tabla 12: Resultados de porcentaje de recuperación por tipo de mineral .....	63

## **Capítulo I: Datos generales de la empresa donde laboró como bachiller realizando trabajos de su especialidad**

### **1.1. Actividad Principal**

La actividad principal de la empresa Marcobre S.A.C. es la extracción de cobre como cátodos de electrodepositados y como concentrados de cobre.

La empresa Marcobre S.A.C. inició sus actividades el día 22 de junio del 2004. Su principal actividad económica es la extracción de minerales metalíferos (Sunat, 2022). Es importante mencionar que esta empresa presenta como mayor accionista a la empresa Minsur S.A.

### **Tabla 1**

*Datos de la empresa Marcobre S.A.C.*

<b>Campo</b>	<b>Información</b>
Razón social	Marcobre S.A.C
RUC	20508972734
Estado del contribuyente	Activa
Domicilio fiscal	Jr. Giovanni Batista Lorenzo Bernini N° 149 Int. 301 Urb. San Borja Lima - Lima - San Borja
Página Web	www.marcobre.com
Teléfono	(511) 617-1300

La empresa cuenta con profesionales de diversas especialidades capaces de atender las necesidades de todas las etapas de producción, administración, atenciones médicas, entre otros.

### **1.2. Sector industrial al que pertenece**

El sector industrial al que pertenece la empresa es al sector minería de acuerdo con la Organización Internacional de Trabajo (OIT).

De acuerdo con el código CIU Rev. 4 de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme, la clase de actividad económica que le corresponde a la empresa es 0729 – Extracción de otros minerales metalíferos no ferrosos. Esta clase comprende la extracción y preparación de minerales estimados principalmente por su contenido de Metales no ferrosos: aluminio (bauxita), cobre, plomo, zinc, estaño, manganeso, cromo, níquel, cobalto, molibdeno, tántalo, vanadio, etcétera; Metales preciosos: oro, plata, platino (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2022). En la Figura 1 se muestra la ubicación de las oficinas en Lima, mientras que en la Figura 2 se muestra la ubicación de la planta a 50 km del distrito de San Juan de Marcona en la provincia de Nasca.

### Figura 1

*Mapa de la ubicación de la empresa Marcobre S.A.C.*



*Nota.* Tomado de [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps)

**Figura 2**

*Ubicación de la planta de producción de Marcobre*



Nota. Tomado de [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps)

### **1.3. Líneas de productos**

La empresa Marcobre S.A.C. se encarga de procesar minerales metálicos para obtener dos líneas de productos; concentrado de cobre, a partir de minerales sulfurados, y cátodos de cobre, a partir de minerales oxidados.

### **1.4. Filosofía administrativa**

#### **1.4.1. Visión**

Desarrollar y operar activos mineros de clase mundial, siendo un referente en términos de seguridad, eficiencia operacional, responsabilidad socio - ambiental y desarrollo de personas (Marcobre S.A.C., 2022).

#### **1.4.2. Misión**

Generar valor transformando recursos minerales de manera sostenible (Marcobre S.A.C., 2022).

### **1.4.3. Valores**

Los valores de la empresa Marcobre S.A.C. son la seguridad, confianza, excelencia, integridad, compromiso y responsabilidad (Marcobre S.A.C., 2022).

### **1.4.4. Políticas**

La empresa cuenta con las siguientes políticas (Marcobre S.A.C., 2022):

#### Aplicados a la empresa:

- Sostenibilidad: La empresa reafirma su compromiso con el objetivo de proteger la vida y la salud, cuidar el medio ambiente, respetar los derechos humanos y generar valor social en la comunidad de su área de influencia.
- Derechos humanos: La empresa el deber de tiene se plantea la obligación de respetarlos y promoverlos, evitando así que sus actividades contribuyan y/o provoquen la violación de estos.
- Código de ética y conducta: La empresa plantea que todo personal deberá promover, tanto al interior de la empresa como en su sociedad una cultura basada en integridad.
- Empleo local: La empresa asegura que se dará una prioridad de contratación al personal local que cumpla con los requisitos de los puestos solicitados.
- Adquisición de bienes y servicios locales: La empresa asegura que se promoverá la generación de oportunidades de adquisición de bienes y servicios locales que cumplan con los estándares requeridos.
- Prevención de la corrupción, lavado de activos y financiamiento del terrorismo: La empresa establece su compromiso de impedir la incorporación de fondos vinculados al lavado de activos, tanto a su capital social como a sus actividades.



- Política de interacción con funcionarios públicos: La empresa asegura la prevención de actividades ilícitas derivadas de la interacción y relacionamiento con funcionarios públicos.
- Marco de modelo de prevención: La empresa asegura el uso de herramientas de prevención, vigilancia y control para resguardarla de la comisión de delitos o situaciones irregulares que puedan perjudicar su reputación.

Aplicados a los trabajadores:

- Trabajo libre de alcohol y drogas: La empresa establece la no tolerancia del consumo de alcohol o drogas en el trabajo, ni durante una comisión.
- Prevención de acoso, hostigamiento sexual y hostilidad laboral: La empresa rechaza cualquier tipo de conducta sexual o sexista para garantizar un ambiente de trabajo libre de toda forma de hostigamiento sexual.
- Prevención de accidente por fatiga y somnolencia: La empresa promueve el cumplimiento de lineamientos que permitan prevenir accidentes por causa de fatiga o somnolencia durante la conducción de vehículos.
- Derecho a decir no: La empresa otorga a los trabajadores la facultad de negarse a efectuar un trabajo (derecho a decir no) que ponga en riesgo la vida o la salud del trabajador o de otras personas.

### **1.5. Cultura organizacional**

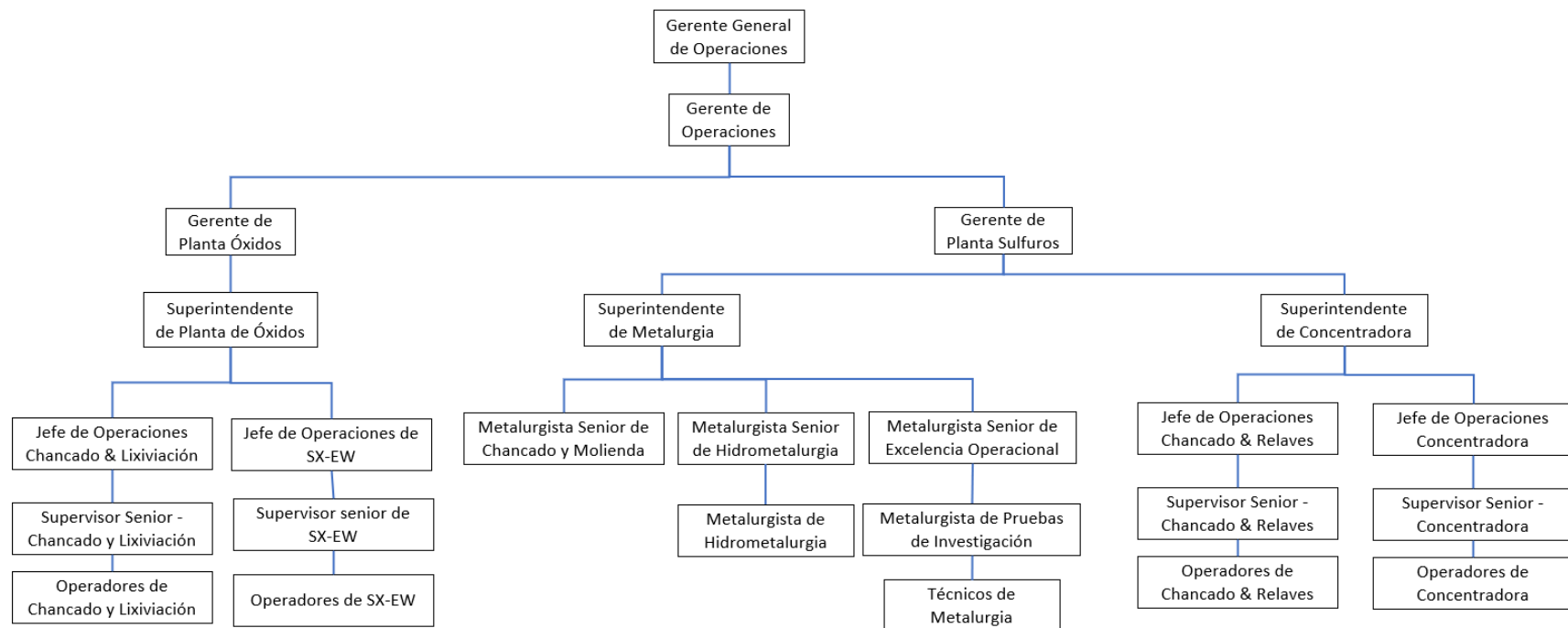
La cultura organizacional de Marcobre S.A.C. está basada en la aplicación de los valores mencionados en la sección 1.4.3 durante el desarrollo de todas sus actividades.

### 1.6. Estructura funcional (Organigrama)

En la Figura 3 se muestra la gerencia de operaciones de la empresa Marcobre S.A.C. El puesto que desempeña el Metalurgista de Hidrometalurgia pertenece a la superintendencia de Metalurgia, teniendo como jefe directo al Metalurgista Senior de Hidrometalurgia.

**Figura 3**

*Organigrama de la gerencia de operaciones de la empresa Marcobre S.A.C.*



*Nota.* Tomado del Área de Recursos Humanos de la empresa Marcobre S.A.C. (2022)

### **1.7. Normatividad empresarial**

Marcobre S.A.C. cumple de manera estricta con las leyes, los reglamentos y las normas del país donde opera. En ese sentido, la empresa espera que todos los colaboradores, proveedores y clientes actúen de acuerdo con las leyes y en todo momento hagan lo correcto, incluso si las normas carecen de orientación específica. Si las normas legales establecen disposiciones diferentes a las del código y a las políticas de Marcobre S.A.C., se espera que se acate la regla de conducta más estricta (Marcobre S.A.C., 2022).

### **1.8. Principios de calidad**

La empresa Marcobre S.A.C. tiene como compromiso el cumplimiento de los requisitos, obligaciones legales, acuerdos, convenios, reglamentos y estándares. Además, se comprometen a promover en los trabajadores y principales proveedores una cultura de mejora continua, que permita desempeñar de forma eficiente en las operaciones (Marcobre S.A.C., 2022).

### **1.9. Sistema de seguridad industrial**

Marcobre S.A.C. ha implementado 11 normativas, a las que conoce como reglas por la vida, las cuales se basan en las políticas, protocolos de salubridad, estándares operacionales y administrativos que forman parte del sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional de Marcobre S.A.C. Las reglas por la vida son requisitos que, en caso de no cumplirse, según su exigencia, representan un riesgo importante para la salud, integridad física o la vida del trabajador (Marcobre S.A.C., 2022). Estas son listadas a continuación:

- Alcohol y drogas: Prohibido su uso conservación y distribución.
- Productos químicos peligrosos: Respetar las recomendaciones de la Ficha de Seguridad (FDS) para su almacenamiento, transporte y manipulación.
- Trabajos en caliente: Asegurar la capacitación y autorización.

- Notificación de incidentes: Comunicar inmediatamente todas las condiciones de trabajo inadecuadas, daños y lesiones.
- Equipos, maquinarias y herramientas: Inspeccionar diariamente y usarlos de forma adecuada.
- Guardas de protección y fajas transportadoras: No retirar o alterar sin autorización y verificar constantemente.
- Aislamiento, bloqueo y etiquetado: Cumplir el protocolo de aislamiento, boqueo y etiquetado al intervenir y/o manipular sistemas que involucren energía eléctrica.
- Trabajos en altura: Asegurar el anclaje permanente en los puntos diseñados y aprobados por personal competente.
- Izaje y trabajos con cargas suspendidas: Verificar la certificación y autorización del operador y rigger y la correcta demarcación del área.
- Trabajos en espacios confinados: Identificar los peligros de la atmósfera y obtener los permisos necesarios antes de ingresar.
- Enfermedad infectocontagiosa: Asegurar el distanciamiento necesario, uso de mascarilla y la limpieza de manos permanentemente.

#### **1.10. Gestión de impactos ambientales**

La empresa Marcobre S.A.C. cuenta con cuatro actividades para el control ambiental (Marcobre S.A.C., 2022).

- Implementación del Formato de Cumplimiento y Seguimiento Ambiental (FOCAM): Procedimiento que tiene como función el cumplimiento de compromisos ambientales y es aplicable a todas las actividades de campo ejecutadas en la empresa durante toda su ejecución.
- Monitoreos ambientales: Su función es el aseguramiento de los compromisos asumidos en los diferentes instrumentos de gestión ambiental.

- Relocalización de tillandsiales: Se cuenta con un plan para el rescate y relocalización de tillandsiales y flora asociada.
- Protección de restos arqueológicos: En caso de un hallazgo, se procede a paralizar las respectivas actividades y el arqueólogo monitor a cargo se encargará del respectivo movimiento de tierras.

## **Capítulo II. Cargos y funciones desarrolladas como bachiller**

### **2.1. Contexto laboral**

Luego de la obtención del bachiller, las empresas en donde se laboró son las siguientes:

- INSPECTRA S.A.
- SGS del Perú S.A.C.
- INSPECTORATE SERVICES PERÚ S.A.C
- MARCOBRE S.A.C.

### **2.2. Descripción de cargos y funciones**

En la empresa INSPECTRA S.A., el cargo desempeñado desde 02 de enero 2018 hasta 11 de octubre de 2019 fue de ingeniero de procesos, donde se tuvo como principal función el brindar asesoría para el desarrollo de proyectos de ingeniería a empresas en el sector de hidrocarburos y productos químicos.

En la empresa SGS del Perú S.A.C., el cargo desempeñado desde 02 de enero 2018 hasta 11 de octubre de 2019 fue de ingeniero de procesos, donde se tuvo como principal actividad el desarrollo de pruebas a nivel planta piloto para seleccionar los reactivos a utilizar en una nueva planta de extracción por solventes para la producción de cobre.

En la empresa INSPECTORATE SERVICES PERÚ S.A.C., el cargo desempeñado desde 25 de junio de 2021 hasta 19 de junio de 2022 fue de analista de laboratorio, donde se tuvo como principal actividad el analizar por procedimientos volumétricos y potenciométricos las muestras de soluciones del proceso de lixiviación y extracción por solventes para la producción de cobre.

En la empresa MARCOBRE S.A.C., el cargo desempeñado desde 20 de junio de 2022 hasta la actualidad es de Metalurgista de hidrometalurgia, donde se tiene como principal actividad el supervisar, analizar y proponer mejoras y soluciones a los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición en el proceso de hidrometalurgia del cobre.

### **2.3. Responsabilidades señaladas en el Manual de Organización y Funciones, ROF, TUPA, u otros documentos de la normatividad empresarial**

En la empresa INSPECTRA S.A. el cargo de ingeniero de procesos cuenta con las siguientes responsabilidades:

- Desarrollo de ingeniería para empresas de procesos químicos.
- Elaboración de estudios de riesgos, Hazop y Hazid.
- Elaboración de P&IDs y PFDs.
- Elaboración de cálculos hidráulicos de sistema de tuberías.
- Elaboración de hojas de especificación de equipos y de instrumentos de medición y control.

En la empresa SGS DEL PERÚ S.A.C. el cargo de ingeniero de procesos cuenta con las siguientes responsabilidades:

- Operación de planta piloto de extracción por solventes en el proceso hidrometalúrgico del cobre.
- Operación de bateas de lixiviación de minerales de cobre.
- Realizar informes de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.

En la empresa INSPECTORATE SERVICES PERU S.A.C. el cargo de analista de laboratorio cuenta con las siguientes responsabilidades:

- Análisis en laboratorio de soluciones líquidas del proceso hidrometalúrgico del cobre.
- Reporte de resultados hacia el jefe de laboratorio.

En la empresa MARCOBRE S.A.C. el cargo de metalurgista de hidrometalurgia cuenta con las siguientes responsabilidades:

- Monitorear y brindar asesoría a la supervisión de la operación de planta, orientada en maximizar la recuperación de cobre en lixiviación.
- Elaborar los reportes diarios de producción de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición.
- Difundir los objetivos de producción de las plantas de chancado, aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición a corto, mediano y largo plazo.
- Realizar, monitorear y controlar pruebas metalúrgicas a escala industrial que hayan sido planificadas con el objeto de maximizar la recuperación.
- Controlar los parámetros operacionales y costos de operación e insumos.
- Proponer proyectos de mejora continua con impacto en la producción y productividad de la planta en el proceso de chancado, lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición.

#### **2.4. Personal a su cargo y sus responsabilidades**

En ninguna de las empresas (INSPECTRA S.A, SGS DEL PERÚ S.A.C, INSPECTORATE SERVICES PERÚ S.A.C y MARCOBRE S.A.C.) se contó con personal asignado, por lo que no es posible describir en este apartado.

#### **2.5. Funciones ejecutivas y/o administrativa**

Las funciones ejecutivas y administrativas desarrolladas en la empresa INSPECTRA S.A. se indican a continuación:

- Visita a plantas industriales para la recolección de información en el desarrollo de la ingeniería conceptual, básica y detalle.



- Reunión con proveedores para asesoría en la selección de equipos e instrumentos de control y medición durante el desarrollo de la ingeniería de detalle.
- Asesoría de empresas especializadas para el desarrollo de comité Hazop y Hazid.
- Recopilación de criterios de diseño bajo estándares nacionales e internacionales durante el desarrollo de la ingeniería básica y detalle.

Las funciones ejecutivas y administrativas desarrolladas en la empresa SGS DEL PERÚ S.A.C. se indican a continuación:

- Gestión de compras de reactivos e insumos de laboratorio para el desarrollo de las pruebas en la planta piloto de la etapa de extracción por solventes.
- Coordinación con el laboratorio químico para el reporte de resultados de las muestras de soluciones químicas.
- Armado y puesta en marcha de la planta piloto de la etapa de extracción por solventes.
- Presentación del informe final con la recomendación del reactivo extractante a utilizar para el proceso hidrometalúrgico del cobre para la empresa MARCOBRE S.A.C.

Las funciones ejecutivas y administrativas desarrolladas en la empresa INSPECTORATE SERVICES PERU S.A.C. se indican a continuación:

- Coordinación con el área de operaciones para definir los criterios y métodos de análisis de las muestras recibidas.
- Proponer mejoras en los métodos de ensayos utilizados.

Las funciones ejecutivas y administrativas desarrolladas en la empresa MARCOBRE S.A.C. se indican a continuación:

- Brindar apoyo a la gerencia para la presentación del cumplimiento o no cumplimiento de la meta de producción mensual.

- Coordinar con el área de operaciones para la resolución de problemas que puedan presentarse en la operación y establecer compromisos en la toma de acciones.
- Brindar apoyo al área de operaciones para la selección de reactivos a utilizar en la operación realizando el contacto con proveedores, planteamiento de pruebas a escala de laboratorio y elaboración de informes finales con las recomendaciones respectivas.
- Realizar las coordinaciones con las empresas contratistas para asegurar el correcto orden y limpieza de los laboratorios y planta industrial.
- Coordinaciones con el área de mantenimiento mecánico y eléctrico para el mantenimiento preventivo o correctivo de los equipos e instrumentos en campo.

## **2.6. Cronograma de realización de las actividades**

En la Tabla 2 se presenta las actividades desarrolladas en el período como bachiller. De estas actividades, la actividad en la que se enfocará el presente trabajo es “Supervisión de proceso de hidrometalurgia de cobre”, la cual es la actividad que estoy desarrollando aún en la actualidad y aquella en la que tengo acceso a una mayor cantidad de datos por pertenecer aún a la empresa. Durante esta actividad, se abarcan temas de tres procesos consecutivos: Lixiviación, Extracción por solventes y Electrodeposición.

**Tabla 2***Actividades desarrolladas como bachiller*

Empresa u organización	Actividad desarrollada	Periodo	
		Desde	Hasta
INSPECTRA S.A.	Diseño de plantas industriales	02 de enero 2018	11 de octubre 2019
SGS DEL PERÚ S.A.C. INSPECTORATE	Analista de laboratorio	16 de octubre 2019	31 de enero 2020
SERVICES PERU S.A.C.	Analista de laboratorio	25 de junio 2021	19 de junio 2022
MARCOBRE S.A.C.	Supervisión de proceso de hidrometalurgia del cobre	20 de junio 2022	Actualidad

En el Anexo 1 se muestra las constancias de haber laborado en las empresas mencionadas.

## Capítulo III. Desarrollo de la actividad técnica y aplicación profesional

### 3.1. Contexto laboral en el área de trabajo

#### 3.1.1. *Labores y tareas relacionadas con el tema específico a desarrollar*

El desarrollo del informe de suficiencia profesional se enfocará en las actividades de supervisión de los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición del cobre en la empresa minera Marcobre. Entre las tareas desarrolladas en esta actividad se encuentran:

- Determinación del amperaje inducido al área de electrodeposición.
- Determinación de volumen de extractante a adicionar a la solución orgánica.
- Determinación de la producción de cobre en el mes.
- Determinación de la cinética de lixiviación.

#### 3.1.2. *Conocimientos técnicos de su especialidad requeridos para el cumplimiento de sus labores y tareas*

Los conocimientos requeridos para el desarrollo de esta actividad se muestran a continuación:

##### Cursos de la especialidad de Ingeniería Química:

- Transferencia de masa: Para la etapa de lixiviación se requiere conocimientos de transferencia sólido líquido, en la cual ocurre una transferencia de masa del mineral a la solución lixivante. Mientras que, para la etapa de extracción por solventes, se requiere conocimientos de transferencia líquido-líquido, en la cual ocurre una transferencia de masa de la solución acuosa producto de la lixiviación y la solución orgánica selectiva en iones de cobre.

- Electroquímica: Estos conocimientos son importantes para la estimación del peso de cobre electrodepositado en los cátodos de acero inoxidable.
- Balance de materia y energía: Es requerido contar con estos conocimientos para realizar el balance de soluciones en la planta.
- Fisicoquímica: Es necesario estos conocimientos para poder interpretar las diversas variables del proceso que son reportados por el laboratorio químico, como lo son el potencial, el pH, la tensión superficial, la tensión interfacial, la viscosidad, entre otras.
- Programación digital: Se requiere conocimiento de computación y programación para el manejo de las plantillas en Excel en los diversos reportes generados.

Capacitación post universitaria orientada a obtener conocimientos técnicos:

- Programa de prácticas profesionales en empresa minera Southern Perú Copper Corporation en el área de metalurgia como apoyo a operaciones de extracción por solventes y electrodeposición de cobre, con una duración de 1 año.
- Programa de especialización en metalurgia, culminado el 19 de setiembre del 2019 en la Cámara Minera del Perú con una duración de 200 horas.
- Programa integral de procesamiento de minerales e hidrometalurgia, con una duración de 84 horas, desarrollado del 21 de abril al 23 de junio de 2018 en Tecsup.
- Programa integral de gestión integral de proyectos, con una duración de 108 horas, desarrollado del 8 de junio al 7 de setiembre de 2021 en Tecsup.

En el Anexo 2 se muestra la evidencia de las capacitaciones mencionadas.

### **3.1.3. Participación en actividades complementarias (Investigación, diseño de negocios, Proyectos de innovación, Estandarización de Normas de Calidad, Implementación de Sistemas de Seguridad u otros)**

En la empresa Marcobre S.A.C. participé en la innovación e implementación del instructivo de medición de bandas para cálculo de inventario de orgánico (Ver Anexo 3).

En las empresas laboradas no formé parte de alguna unidad o grupo de seguridad industrial; sin embargo, he participado de manera activa con seguridad en el desarrollo de todas mis funciones. Adicional a ello, en la empresa Marcobre S.A.C. cumplí con las capacitaciones programadas para el año 2022 (Ver Anexo 4)

Finalmente, en la empresa INSPECTORATE SERVICES PERU S.A.C. en el mes de enero 2022 fui elegido el trabajador con mejor desempeño en HSE, por las siglas en inglés Health, Safety & Environment (Ver Anexo 5).

## **3.2. Hechos relevantes de la actividad técnica**

### **3.2.1. Descripción de la realidad problemática**

Schlesinger et al. (2011) describen que para el año 2010 el 80% de la producción de cobre era producto de procesos de flotación, fundición y electrorefinación; mientras que el porcentaje restante era producto de la hidrometalurgia de minerales oxidados. Este porcentaje se ha elevado de manera progresiva, a raíz que más compañías mineras comenzaran a implementar este proceso para tratar minerales de baja ley de cobre, algunos que incluso eran desechados como ganga.

Actualmente, en el Perú existen solo 3 empresas mineras que cuentan con el proceso de hidrometalurgia del cobre, Southern Copper Perú Corporation, Cerro Verde, y recientemente Marcobre, con 2 años de operación, esto conlleva a que no existan una gran cantidad de profesionales con la experiencia necesaria para la supervisión de estos procesos. Cabe agregar que las empresas mencionadas se encuentran en el sur del país, por lo que la mayoría de los profesionales con conocimiento acerca de este proceso residen

en dicha zona del Perú, por lo que no les resulta muy atractivo el empezar a laborar en la zona centro, que es donde se ubica la minera Marcobre.

Adicional a ello, los profesionales existentes en el mercado mencionan, en su gran mayoría, que los conocimientos adquiridos de este proceso han sido a través de los años laborando en dichas empresas y que la información brindada por sus estudios de pregrado ha sido muy bajas. Además, es necesario mencionar que el costo de capacitar a un nuevo personal es muy elevado, sin mencionar el tiempo necesario para dicha capacitación.

En un futuro se tiene previsto la incorporación de nuevos proyectos mineros que cuenten con el proceso de lixiviación-extracción por solventes-electrodeposición, como es el caso de Los Chancas, ubicado en Apurímac y asignado a Southern Copper con una fecha estimada de inicio en el 2027 (Cruz, 2021). Por otro lado, el proyecto Tía María, si bien se encuentra paralizado sin fecha de inicio, también tiene contemplado incorporar el proceso hidrometalúrgico del cobre, con una producción estimada de 120,000 toneladas de cobre al año (Martinez, 2021).

Según lo expuesto, en los próximos años habrá un déficit de profesionales con la capacidad necesaria para mantener bajo control este proceso y con ello, deficiencias en el control de las etapas de este proceso; por esta razón, en este informe pretendo compartir la información relevante de una empresa con el proceso hidrometalúrgico del cobre, los parámetros más importantes a controlar, los problemas más comunes durante el proceso y la manera de lidiar con ellos, con la finalidad de asegurar una adecuada supervisión de este proceso.

### **3.2.2. Definición del problema general y secundarios**

#### Problema general

Deficiencias en el control de las tres etapas del proceso de hidrometalurgia del cobre por falta de experiencia.

### Problemas secundarios

- Deficiencias en la recuperación de cobre en la etapa de lixiviación de minerales.
- Deficiencias en la extracción de cobre en la etapa de extracción por solventes.
- Deficiencias en la producción de cobre metálico en la etapa de electrodeposición.

### **3.2.3. Justificación e importancia**

El proceso de hidrometalurgia del cobre no está ampliamente difundido en el Perú, por lo que no existe muchas capacitaciones referentes a este proceso, por ello es importante indagar en las metodologías existentes para la operación de este tipo de plantas.

### **3.2.4. Antecedentes nacionales e internacionales**

#### **i. Antecedente nacional**

Glave y Kuramoto (2007) mencionan que, este proceso comenzó en el Perú con el Proyecto del Cobre ejecutado por el Pacto Andino en el Perú y Bolivia, cuya finalidad fue la investigación de tecnologías adecuadas que emplearan agentes biológicos en el proceso de lixiviación del cobre. La información recolectada en estas investigaciones sirvió como antecedente para el inicio del proyecto Cerro Verde. Uceda (2016) menciona que esta empresa minera inició sus pruebas alrededor del año 1970 con una planta piloto de utilizando la metodología de lixiviación en bateas, para luego construir la primera planta a nivel industrial del país usando esta tecnología.

Desafortunadamente, la información recolectada en las pruebas desarrolladas por el proyecto del Pacto Andino está prácticamente perdida; esto debido a que el proceso que cuenta Cerro Verde en la actualidad es la tecnología usada de manera comercial en el resto del mundo. Esto conllevó a una reducción de alternativas disponibles a emplear (Glave & Kuramoto, 2007).

Posteriormente, la empresa minera Southern Perú Copper Corporation inició sus estudios de lixiviación en columnas para minerales sulfurados de baja ley en el año 1986,



con una lixiviación bacteriana en botaderos, y para el año 1995 inició sus operaciones con los tres procesos de lixiviación- extracción por solventes – electrodeposición (The Institution of Mining and Metallurgy, 1994).

Por otro lado, Sulla (2013) describe que para el caso de la planta de la empresa Xstrata Tintaya, inició sus operaciones el año 1985 con la extracción de minerales sulfurados y durante esta actividad se reubicaba de manera selectiva los minerales oxidados en zonas conocidas como stocks de óxidos, paralelamente mantenían sus estudios e investigaciones para procesar estos minerales desde el año 1982, hasta completar su proceso de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición. Sin embargo, ya para el año 2011, la empresa presentó una disminución en sus recursos, reduciendo su producción en un 48% (Pascoletti et al., 2013).

## **ii. Antecedente internacional**

La hidrometalurgia del cobre comenzó a tomar una fuerte importancia desde el inicio del siglo 20; una de las primeras plantas en procesar minerales oxidados de cobre con esta tecnología fue en la compañía de cobre Chuquicamata en Chile en el año 1912, en donde estos minerales eran lixiviados por una solución con bajo contenido de ácido sulfúrico; adicional a ello, también se lograba procesar minerales sulfurados debido al ion férrico (agente oxidante) presente en dichos minerales. Estas soluciones producto de la lixiviación, en lugar de ser sometidas al ampliamente conocido proceso de cementación de cobre, fue sometido a, el entonces nuevo proceso llamado, electrodeposición (Habashi, 2005).

Tilton y Landsber (1997) detallan que tanto el proceso de cementación como el de electrodeposición no eran capaces de producir cobre de calidad suficiente para igualar la calidad de pureza con el cobre electrefinado, producto del proceso pirometalúrgico del cobre. No fue sino hasta el desarrollo de la tecnología de extracción por solventes durante y luego de la segunda guerra mundial que se logró obtener cobre de mayor pureza.

A pesar de haber sido conocida la tecnología de extracción por solventes, no fue probada de manera comercial, ya que la mayoría de empresas continuaban reacios a probarlas y continuaban a la espera de que alguien más dé el primer paso. Para el año 1968, la creencia más extendida era que el proceso de electrodeposición del cobre no era capaz de producir cátodos de buena calidad en gran escala. Fue durante este año que la empresa Ranchers Bluebird puso en operación la primera planta comercial de lixiviación – extracción por solventes – electrodeposición, con una producción de 9 millones de libras de cobre (82% su capacidad de diseño) en su primer año de operación. Esto logró demostrar que esta nueva tecnología era capaz de producir cobre de buena calidad a gran escala, ocasionando un aumento en el interés por ella (Kordosky, 2002).

Paynter (1973) describe que, en los años 70, la hidrometalurgia fue impulsada por factores ambientales, siendo la contaminación del dióxido de sulfuro, producto del proceso de pirometalurgia en la etapa de fundición, uno de los mayores factores, pero no el único. Adicionalmente menciona una serie de factores que también contribuyeron a un mayor número de investigaciones por esta tecnología emergente.

- Aumento en el número de yacimientos de minerales no sulfúricos: Existen minerales que, debido a problemas de rentabilidad o problemas técnicos, no son capaces de ser procesados mediante flotación y fundición, o cuya eficiencia de recuperación es muy baja.
- Bajo costo de reactivos químicos usados en la hidrometalurgia: Algunos reactivos utilizados como el oxígeno, amoníaco, cloro, entre otros, son producidos en grandes volúmenes y a bajo costo. Mientras que el ácido sulfúrico, al ser subproducto en las refinerías, también se consigue a un bajo precio.
- Alto costo del transporte de concentrados: El aumento continuo del costo de transporte de concentrados hacen que las refinerías sean menos competitivas ante plantas de hidrometalurgia.

Durante los años 80, el proceso de extracción por solventes reemplazó con facilidad los procesos de la electrodeposición directa y la cementación; sin embargo, la calidad del cobre obtenido aún no era equiparable al del cobre electrorefinado, por lo que era vendido a un menor precio y empleado para generar aleaciones y otros fines que no requiriesen una calidad muy elevada. Este escenario cambió luego de algunas mejoras en el proceso, como el desarrollo de nuevos agentes extractantes con mayor selectividad hacia el cobre que hacia otras impurezas (Tilton & Landsber, 1997).

Uceda (2016) agrega que otro factor adicional al avance de la hidrometalurgia fue que los cátodos de cobre producidos por la electrodeposición eran de igual porcentaje de pureza que los cátodos de cobre obtenidos mediante electrorefinación. También hace énfasis en la ventaja de esta tecnología para el procesamiento de minerales polimetálicos con una ley baja de cobre y con un alto contenido de impurezas, que de ser procesados mediante flotación y posteriormente por flotación, resultarían no rentables. Tilton y Landsberg (1997) detallan que el proceso de hidrometalurgia ayudó a repotenciar la producción de cobre en Estados Unidos en la década de los 70, ya que con ella era posible procesar minerales con una ley menor a la tecnología convencional de fundición, además de cumplir con las normativas ambientales.

En la última década del siglo XX, la hidrometalurgia tuvo un avance muy notorio, elevando su producción de 708,000 a 2,013,000 toneladas, significando un incremento del 9.6% al 19.8% en contribución en la producción mundial total de cobre (Beckel, 2000). En la Tabla 3 se muestra el incremento de la producción de cátodos de cobre en el mundo.

**Tabla 3***Producción de cátodos de cobre a nivel mundial*

Proceso	Producción de cobre (kTon/año)	
	1990	1998
Lixiviación en pilas	43	1100
Otros procesos de lixiviación	665	900
Total	712	2000

*Nota:* Tomado de El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile (2000)

Según lo mostrado en la tabla anterior, el proceso de lixiviación-extracción por solventes-electrodeposición incrementó su producción a casi 26 veces en un lapso de 9 años.

**3.2.5. Objetivo general y específico**Objetivo general

Supervisar los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición de cobre.

Objetivos específicos

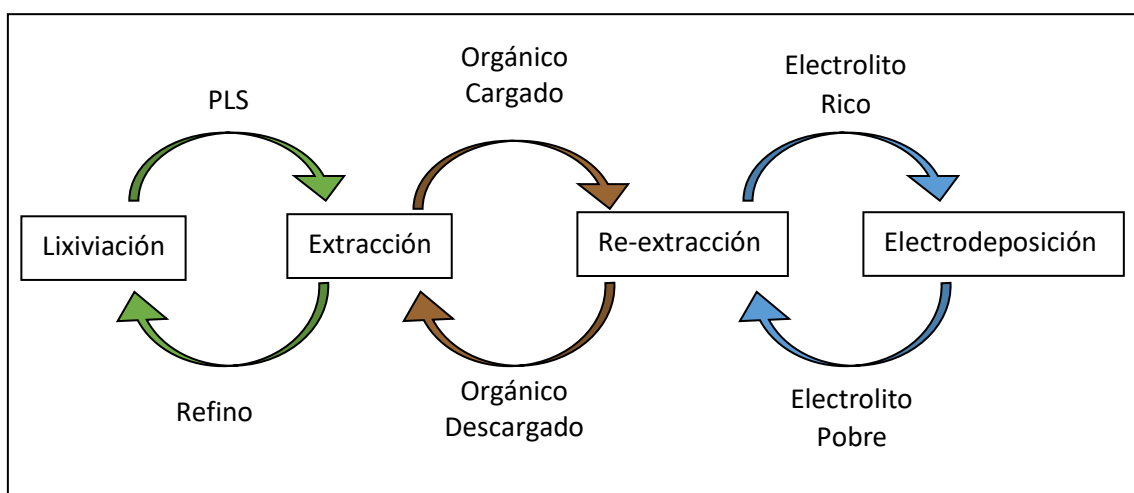
- Simulación de la etapa de lixiviación para establecer las variables operativas que permitan el mejor porcentaje de recuperación de cobre del mineral a lixiviar.
- Simulación de la etapa de extracción por solventes para establecer las variables operativas que permitan el mejor porcentaje de extracción de cobre de la solución PLS.
- Simulación mensual de la etapa de electrodeposición para establecer las variables operativas que permitan la máxima producción de cátodos de cobre.

### 3.3. Marco conceptual y teórico de los conocimientos técnicos requeridos

El proceso de hidrometalurgia cuenta con 3 etapas, la etapa de lixiviación, la etapa de extracción por solventes, dividida en las subetapas de extracción y re-extracción, y la etapa de electrodeposición. La Figura 4 esquematiza las tres etapas de la hidrometalurgia del cobre con las soluciones involucradas en cada una de ellas.

**Figura 4**

*Diagrama de etapas del proceso de hidrometalurgia del cobre*

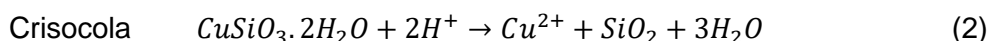
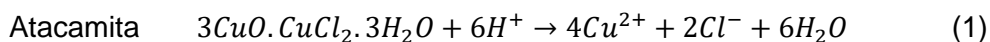


*Nota:* Elaboración propia

Según se puede apreciar en la Figura 4, las soluciones se encuentran en ciclo cerrado, por lo que no se emiten efluentes al ambiente, haciéndolo un proceso amigable con el ecosistema. Las tres etapas de la hidrometalurgia del cobre se explican con mayor detalle a continuación:

#### 3.3.1. Etapa de lixiviación

Los minerales con mayor presencia en la alimentación al área de lixiviación en la empresa Marcobre son la atacamita y la crisocola; (Jergensen II, 2009) muestra el mecanismo de la disolución de dichos minerales de cobre en soluciones de ácido sulfúrico.



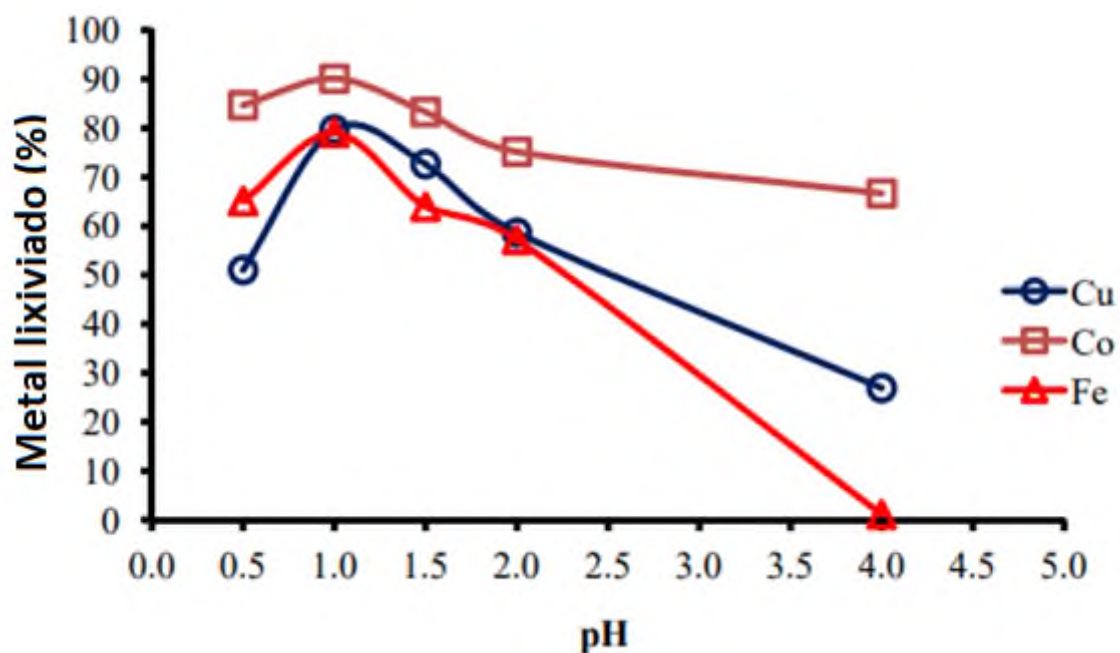
Estas reacciones nos describen que es necesario un medio ácido para su disolución y poder pasar el cobre del mineral a ión cobre en la solución lixiviante.

Apua et al. (2013) describen que estas reacciones están influenciadas por los siguientes parámetros:

- Efecto del pH: La Figura 5 muestra que la lixiviación del cobre se ve favorecida para pH cercanos a la unidad, disminuyendo su porcentaje de recuperación ante el aumento o la disminución del pH de este valor.

**Figura 5**

*Efecto del pH sobre la lixiviación de minerales de óxidos de cobre*

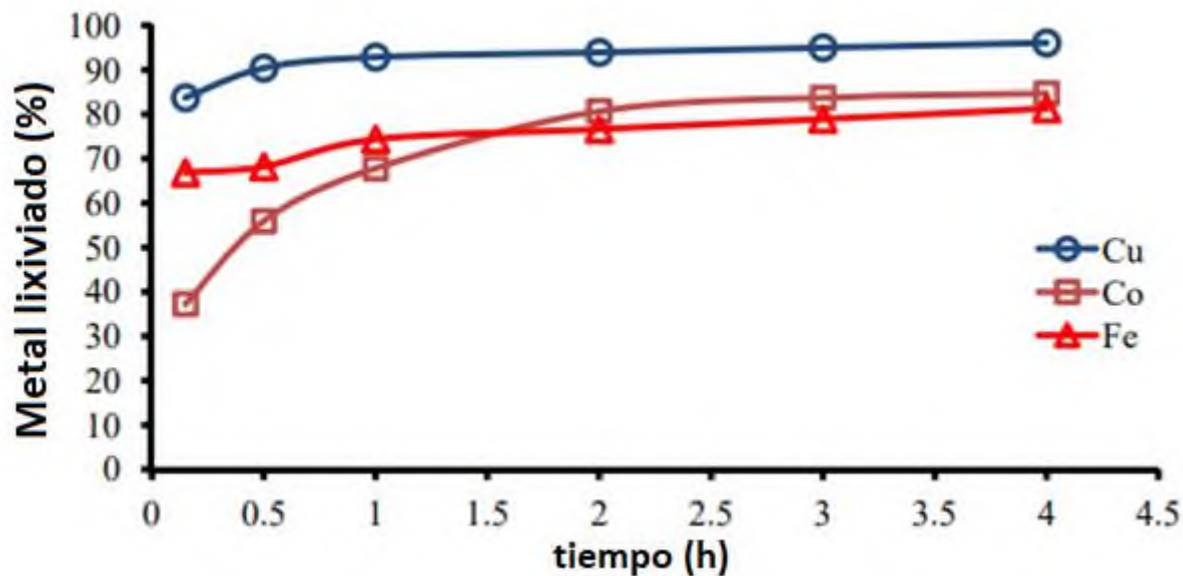


*Nota:* Tomado de A study of leaching of copper oxide ore by sulphuric acid (2013)

- Efecto del tiempo: Como se muestra en la Figura 6, la lixiviación del cobre se ve favorecida ante un mayor tiempo de exposición ante la solución de ácido sulfúrico.

Figura 6

Efecto del tiempo sobre la lixiviación de minerales de óxidos de cobre



Nota: Tomado de A study of leaching of copper oxide ore by sulphuric acid (2013)

Para la planificación de la producción, es importante conocer la velocidad de recuperación, y para ello es importante conocer modelos matemáticos que permitan simular el comportamiento cinético de la lixiviación. Aydin y Gül (2021) listan 2 modelos cinéticos para la determinación de la recuperación en función del tiempo.

El primero es atribuido a García-Zúñiga, el cual es un modelo de primer orden el cual modela la variación de la concentración del mineral evaluado en a un determinado tiempo.

$$R = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

Donde:

R es la recuperación en función del tiempo

$R_{\infty}$  es la máxima recuperación posible, la cual es menor a 100%

k es la constante de cinética

El segundo modelo corresponde a una distribución rectangular, siendo un modelo resultado de la modificación de un modelo cinético de primer orden, comúnmente llamado modelo de Klimpel.

$$R = R_{\infty} \left[ 1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right] \quad (4)$$

Donde:

R es la recuperación en función del tiempo

$R_{\infty}$  es la máxima recuperación posible, la cual es menor a 100%

k es la constante de cinética

Estas ecuaciones son utilizadas al momento de modelar el comportamiento cinético de una lixiviación.

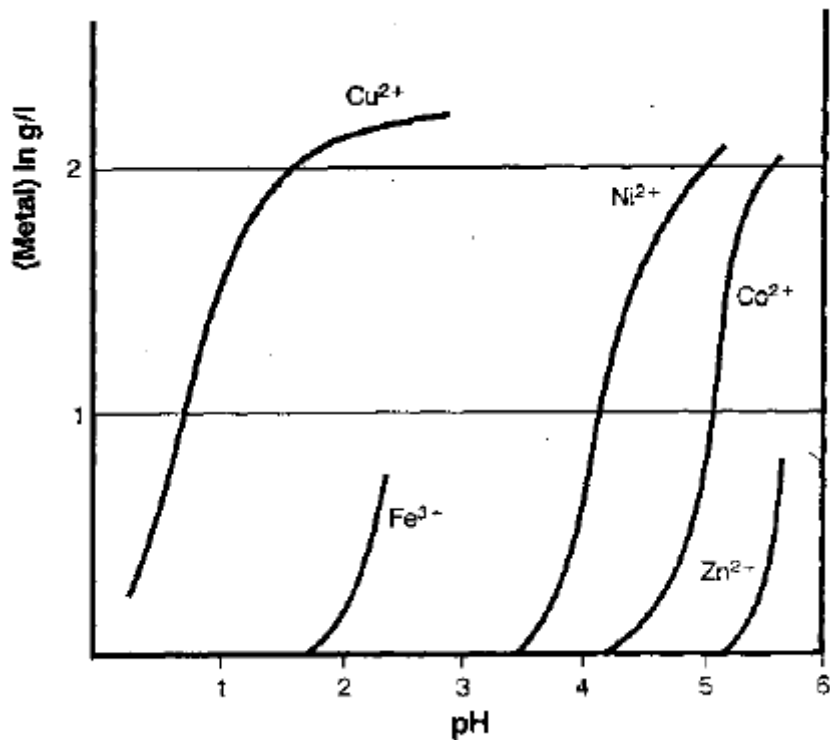
La solución final de esta etapa es conocida como PLS por sus siglas en inglés (Pregnant Leaching Solution), una solución rica en cobre que será transportada hacia la etapa de extracción por solventes donde, luego de ceder el cobre, se transforma en una solución con bajo contenido en cobre conocida como Refino, la cual se utilizará como agente lixivante.

Esta etapa está muy determinada por el pH de la solución acuosa, en la Figura 7 se observa el ion metálico que será extraído de la solución acuosa dependiendo del pH de la solución. De esta imagen, se puede ver que el rango de operación preferido para la extracción de cobre es con un pH entre 1 y 2, para evitar la extracción de otros metales que puedan actuar como interferentes en la reacción.



Figura 7

Metal extraído en función del pH de la solución acuosa



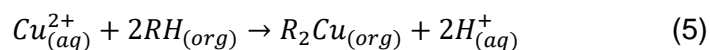
Nota: Tomado de Hidrometalurgia avanzada (2016)

### 3.3.2. Etapa de extracción por solventes

Komulainen et al. (2009) describen que el proceso de extracción por solventes tiene como objetivo principal el maximizar el cobre extraído de la solución de PLS y generar un electrolito rico con una concentración sin muchas variaciones y con la menor cantidad de contaminantes a la etapa de electrodeposición.

Jergensen II (2009) explica que ambas etapas, extracción y re-extracción, pueden ser descritas con una sola ecuación química, dependiendo del sentido de la reacción.

Etapa de extracción



Donde:

$Cu_{(aq)}^{2+}$  es el ion cobre en la solución de PLS

$2RH_{(org)}$  es el extractante (orgánico descargado)

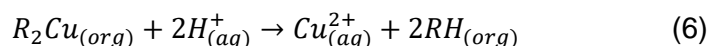
$R_2Cu_{(org)}$  es el complejo de cobre/extractante (orgánico cargado)

$2H_{(aq)}^+$  es el ácido en la solución de refino

La reacción mostrada explica que el sentido se ve favorecido ante bajos niveles de acidez.

La extracción del cobre se lleva a cabo cuando la solución de PLS es mezclada con orgánico descargado, el cual contiene un agente extractante selectivo en cobre. El extractante forma un complejo con el cobre convirtiéndose en una solución conocida como orgánico cargado, la cual es transportada a la subetapa de re-extracción; a su vez, la solución acuosa, al haber perdido su contenido de cobre y aumentado su nivel de acidez, se convierte en la solución conocida como refino, la cual es transportada a la etapa de lixiviación.

Etapa de re-extracción



Donde:

$R_2Cu_{(org)}$  es el complejo de cobre/extractante (orgánico cargado)

$2H_{(aq)}^+$  es el ácido consumido en la solución de electrolito

$Cu_{(aq)}^{2+}$  es el ion cobre en la solución de electrolito rico

$2RH_{(org)}$  es el extractante (orgánico descargado)

La reacción descrita explica que el sentido se ve favorecido ante altos niveles de acidez.

La re-extracción del cobre se lleva a cabo cuando una solución de alta acidez (electrolito pobre con 180 g/l de ácido) es mezclada con el orgánico cargado. El complejo de cobre/extractante libera el ion cobre, elevando el contenido de cobre en la solución acuosa, formándose la solución conocida como electrolito rico, la cual es transportada a la

etapa de electrodeposición; a su vez, la solución orgánica al haber perdido su contenido de cobre se convierte en la solución conocida como orgánico descargado, la cual es transportada a la etapa de extracción.

#### Conceptos fundamentales de la etapa de extracción por solventes

- Solución acuosa

Es una mezcla líquida, compuesta por ácido y que contiene una cantidad de iones metálicos disueltos en ella. Esta puede ser la solución PLS (producto de la lixiviación), refino (solución con bajo contenido de cobre), electrolito pobre o electrolito rico.

- Solución orgánica

Es una mezcla líquida que contiene dos principales componentes:

- Extractante:

Contiene una molécula capaz de formar estructuras complejas con el ion cobre, permitiéndole transferir el cobre de la solución acuosa a la solución orgánica.

Según Schlesinger, King, Sole, & Davenport (2011), un buen extractante debe contar con las siguientes características:

- Extraer con facilidad el cobre del PLS operando con valores normales de pH resultado de la lixiviación.
- Liberar el cobre hacia el electrolito operando bajo concentraciones normales de ácido en la etapa de electroposición.
- Permitir una separación rápida del acuoso y orgánico luego de la etapa de mezclado.
- Ser insoluble en fases acuosas.
- Ser selectivo en el cobre sobre otros metales, principalmente el hierro y manganeso.

- Diluyente:

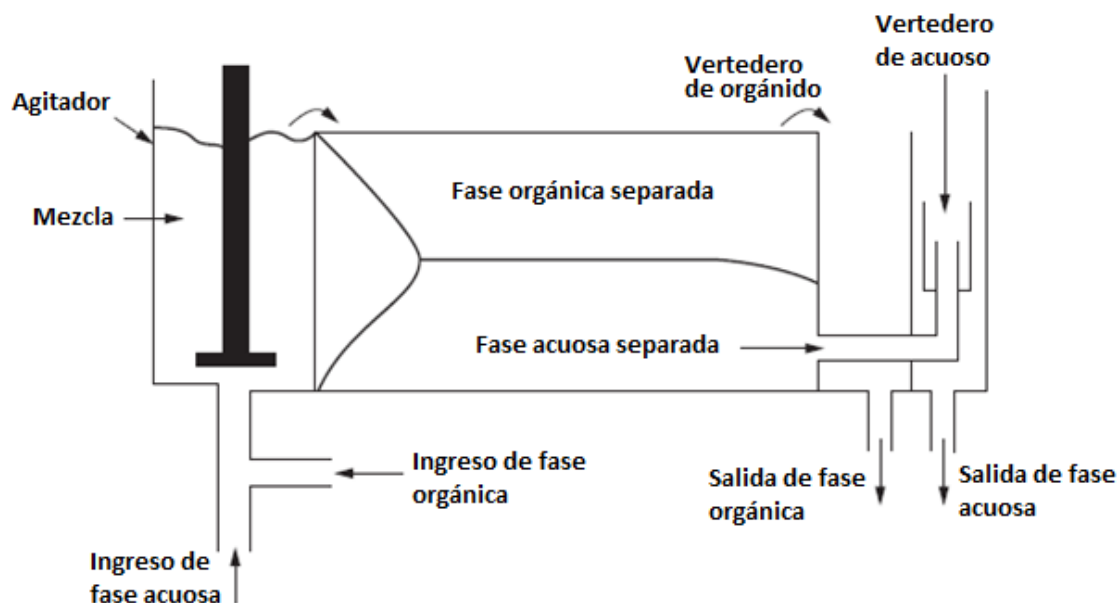
Es un hidrocarburo inerte capaz de disolver al extractante, que cuente con una baja viscosidad, con la finalidad de ser capaz de ser transportado mediante bombas y mezclado con la fase acuosa para permitir la transferencia de iones, y una baja densidad, con la finalidad de agilizar la separación de las dos fases por la acción de la gravedad.

- Agitador-sedimentador

La fase acuosa y orgánica son succionadas hacia el agitador a través del impeler, este tipo de agitador evita la necesidad de contar con una bomba individual para cada fase. La transferencia de masa ocurre durante la agitación, luego del cual rebosan hacia el sedimentador, donde ambas fases se separan por diferencia de densidad y la acción de la gravedad. En el otro extremo del sedimentador, el orgánico rebosa hacia la canaleta de orgánico y el acuoso pasa a través de un canal hacia la canaleta de acuoso. En la Figura 8 se muestra un diseño convencional de agitador-sedimentador (Sole, 2008), donde se observa que el diseño aprovecha la diferencia de densidades de estas dos soluciones para dirigirlas a diferentes destinos.

**Figura 8**

*Agitador-sedimentador convencional*



*Nota:* Tomado de Solvent Extraction in the Processing and Purification of Metals: Process Design and Selected (2008)

- Crudo

Sole (2008) describe que el término crudo es atribuido a la emulsión estable conformada por sólidos, acuoso, orgánico y aire, y está presente en todas las instalaciones de extracción por solventes. Dependiendo de su composición, puede llegar a ser de tres tipos.

Existe un crudo de alta densidad, que se deposita en el fondo del sedimentador y está conformado mayormente por sólidos. No logra ocasionar mayores problemas operativos más que el espacio que ocupa, restando espacio disponible para el inventario de soluciones.

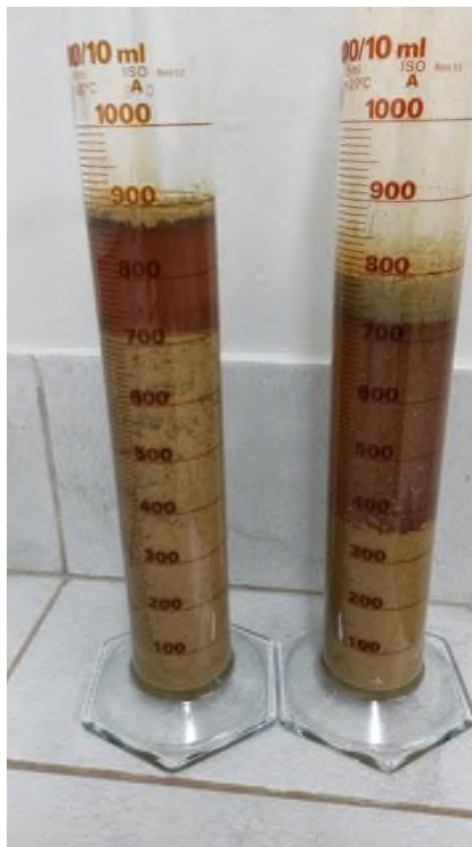
El segundo tipo de crudo es el flotante, con una densidad menor a la de la fase acuosa. Este tipo de crudo es el más perjudicial ya que se desplaza junto el orgánico, arrastrando consigo una gran cantidad de impurezas de etapa en etapa.

El tercer tipo de crudo es el interfacial, que se deposita entre la fase orgánica y acuosa. Este tipo de crudo es de forma compacta y es relativamente sencillo de retirar del

sistema mediante su bombeo; en la Figura 9 se observa una formación típica de crudo en la etapa de extracción por solventes.

### Figura 9

*Crudo formado en la etapa de extracción por solventes*



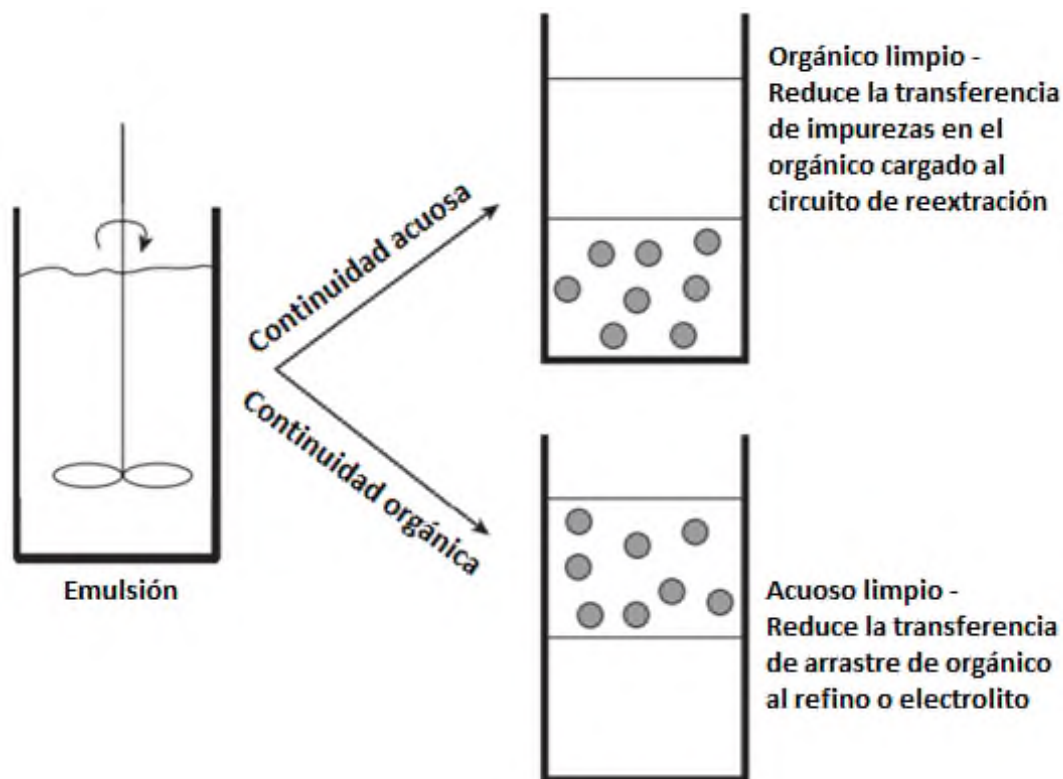
*Nota:* Tomado de Crud Forx - A New Approach to Crud Management, 2015

- Continuidad de fases

Sole (2008) describe que al mezclar la fase acuosa y orgánica pueden ocurrir escenarios con la mezcla. Si la fase acuosa es la matriz de la mezcla y el orgánico se encuentra disperso en forma de gotas, la mezcla se conoce como acuoso continuo, mientras que de la forma inversa se conoce como orgánico continuo, como se visualiza en la Figura 10.

Figura 10

Representación de continuidad orgánica y acuosa



*Nota:* Tomada de Solvent Extraction in the Processing and Purification of Metals: Process Design and Selected (2008)

En una mezcla en continuidad orgánica, al momento de detenerse la agitación y comenzar a separarse, la fase acuosa se encontrará no presentará arrastres de fase orgánica en su interior, mientras que la fase orgánica tendrá en su interior un contenido de gotas de solución acuosa. De la misma manera, al separarse una mezcla en continuidad acuosa, la fase orgánica no presentará arrastres, mientras que la fase acuosa presentará gotas de solución orgánica en su interior.

Una de las maneras para definir en qué continuidad debe operar una etapa es hacerlo de tal manera de lograr la menor cantidad de arrastre en la fase más crítica; por ejemplo, en la etapa de re-extracción, la fase acuosa debe ingresar a la etapa de electrodeposición con la menor cantidad de orgánico posible, por lo que esta etapa debe

encontrarse en continuidad orgánica, para minimizar los arrastres de orgánico en el acuoso.

Usualmente las plantas trabajan sus etapas en continuidad orgánica, esto debido a que esta continuidad presenta la ventaja de generar un crudo interfacial, el cual es más compacto, y evita que este se desplace a través de las etapas y facilita su remoción.

Jergensen II (2009) detalla que para cambiar la continuidad en un agitador se puede incrementar el flujo bombeado de una de las fases al ingreso del agitador, o mediante la recirculación de una de las fases de vuelta al agitador.

- Isotermas

Jergensen II (2009) describe la importancia de maximizar la transferencia de cobre desde la solución de PLS hacia el electrolito que se dirige a la etapa de electrodeposición, con la mínima de cantidad de otros iones que puedan llegar a ser perjudiciales. Para esto, es necesario determinar las isotermas de equilibrio tanto para la etapa de extracción como la etapa de reextracción

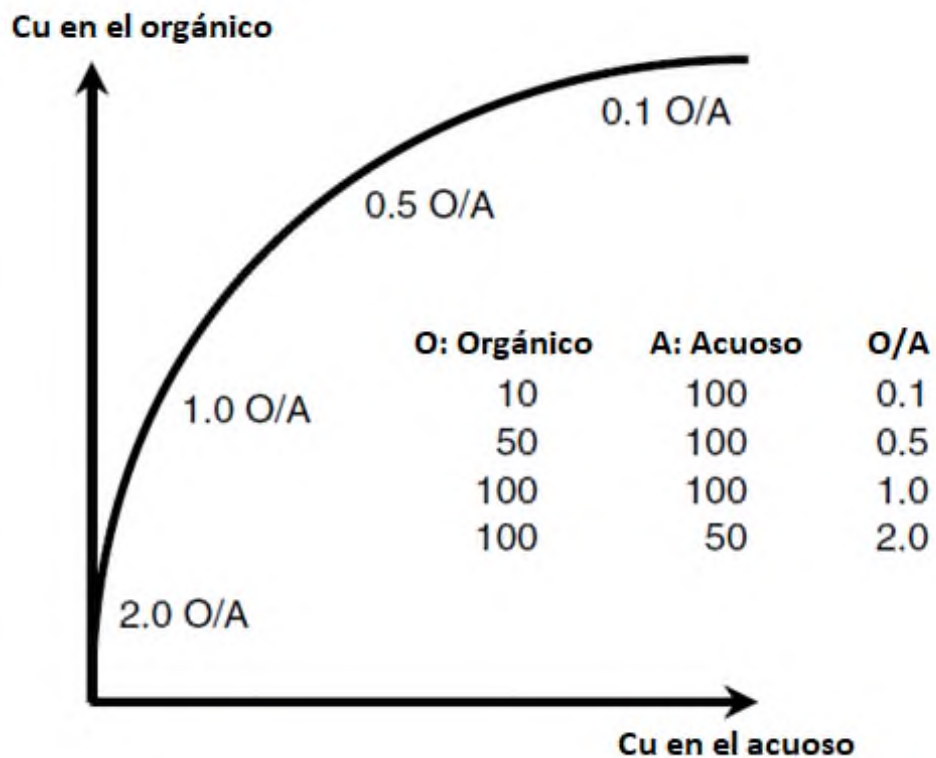
- Isotermas de extracción

La isoterma de extracción muestra la cantidad de cobre que puede ser transferido desde la solución PLS por cada relación orgánico/acuoso. La Figura 11 esquematiza la curva de equilibrio (isoterma) de la transferencia líquido-líquido, contruida mediante el contacto de estas soluciones a diferentes proporciones.



Figura 11

*Isoterma de extracción*



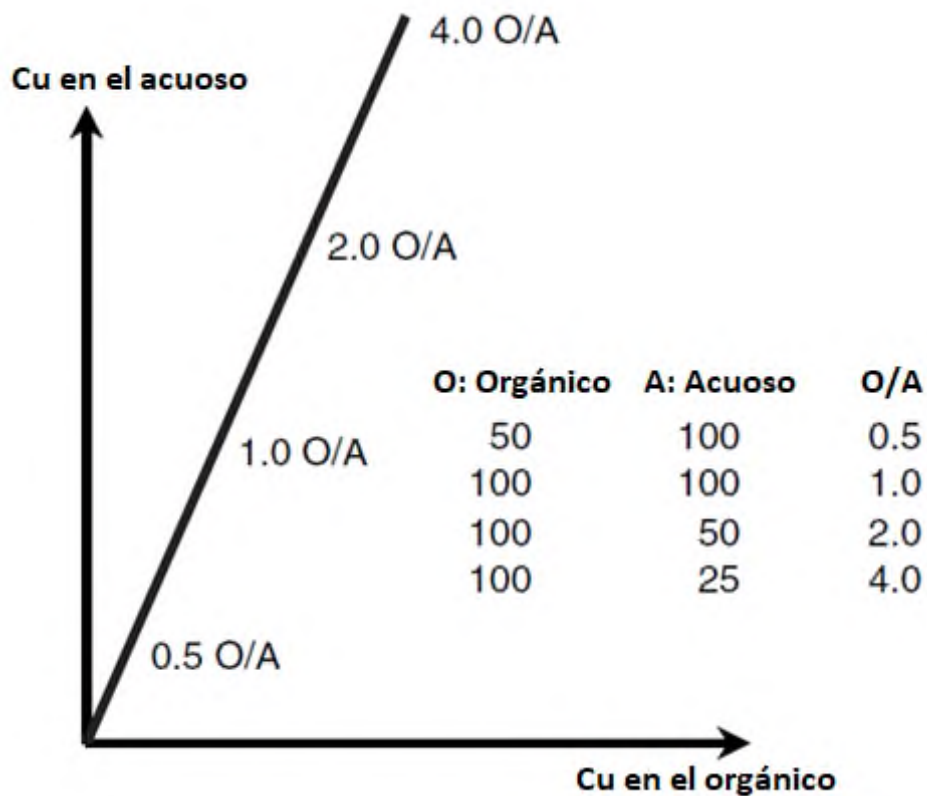
*Nota:* Tomado de Copper leaching, solvent extraction and electrowining technology, 2009

- Isotermas de reextracción

La isoterma de reextracción muestra la cantidad máxima de cobre que puede ser transferida de la fase orgánica por cada relación de orgánico/acuoso. La Figura 12 esquematiza la curva de equilibrio (isoterma) de la transferencia líquido-líquido, contruida mediante el contacto de estas soluciones a diferentes proporciones.

Figura 12

*Isoterma de reextracción*



*Nota:* Tomado de Copper leaching, solvent extraction and electrowining technology, 2009

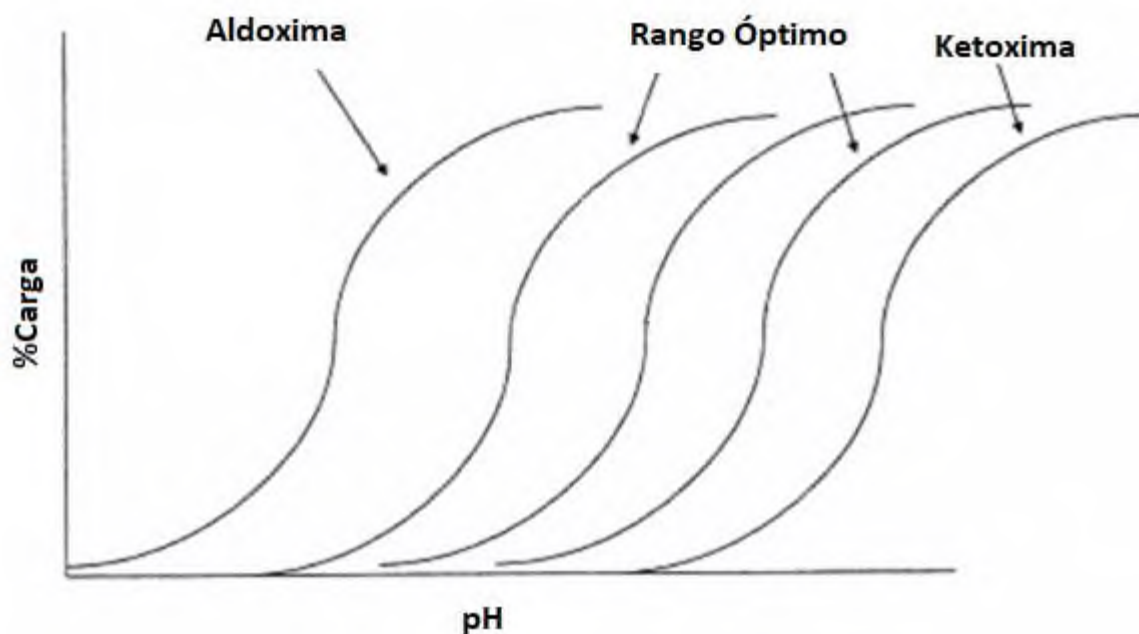
#### Variables operaciones en la etapa de extracción por solventes

- Acidez en la solución acuosa

Littlejohn y Dreisinger (2007) describen que el parámetro más importante durante la extracción y la re-extracción es el control del ácido en la solución acuosa, ya que el equilibrio de las reacciones mencionadas está en función de el pH.

Figura 13

*Esquema del sentido de la reacción (extracción-reextracción) en función del pH*



*Nota:* Tomado de Hydrometallurgy, Technical Review – Copper Solvent Extraction in Hydrometallurgy, 2007

En la Figura 13 se muestra que, ante pH elevados el extractante extraerá cobre de la fase acuosa, mientras que, para pH bajos, el extractante descargará el cobre hacia la fase acuosa. De esto se concluye que el PLS debe contar con un pH adecuado para el cobre se transfiera de la fase acuosa a la fase orgánica, mientras que el electrolito, al contar con un pH muy bajo, descarga el extractante de manera efectiva.

- Razón orgánico / acuoso (O/A)

Es la relación volumétrica entre el contenido de orgánico con respecto al flujo de acuoso que están presentes en el mezclador (Sole, 2008). Para variar este valor, es posible realizar rescirculaciones de alguna de las fases, esto con la finalidad de favorecer alguna continuidad.

$$\frac{O}{A} = \frac{\text{Orgánico}\left(\frac{m^3}{h}\right)}{\text{Acuoso}\left(\frac{m^3}{h}\right)} \quad (7)$$

Esta relación es continuamente monitoreada durante la operación, esto debido a que este parámetro tiene una gran incidencia en el resultado de la eficiencia de extracción, de tal manera que a mayor relación O/A mayor será la extracción de cobre.

- Bandas de dispersión

Luego de salir del mezclador, las soluciones ingresan al decantador donde ambas fases deben terminar de separarse. La zona intermedia de ambas fases en proceso de separación es una fase heterogénea, conocida como banda de dispersión. Es importante monitorear el espesor de esta banda, ya que a mayor sea su valor, mayores arrastres generarán y por ende mayor contaminación a la siguiente fase (Sulla, 2013).

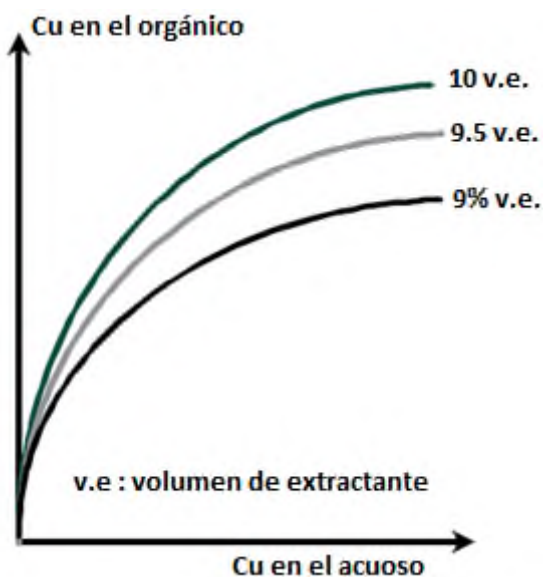
#### Optimización de la etapa de extracción

Jergensen II (2009) menciona que para optimizar ambas etapas, es necesario ajustar los factores que favorezcan la transferencia de la fase acuosa a la fase orgánica, entre ellas tenemos:

- Incrementar el porcentaje en volumen de extractante en la solución orgánica. Debido a este incremento, y manteniendo un flujo similar de las soluciones, la fase acuosa logra interactuar con un mayor contenido de reactivo extractante, lo que resulta un incremento en la curva de equilibrio (isoterma). La Figura 14 muestra cómo un incremento en el porcentaje de extractante permite una mayor transferencia de cobre hacia el orgánico.

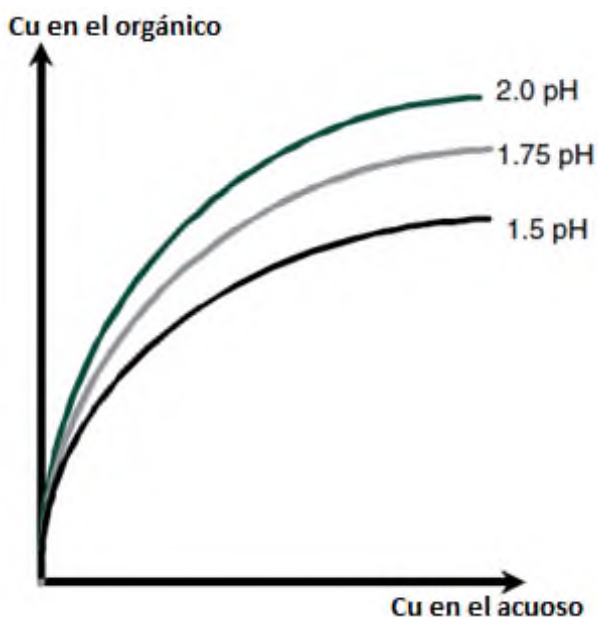
**Figura 14**

*Efecto de la concentración de extractante*



*Nota:* Tomado de Copper leaching, solvent extraction and electrowining technology, 2009

- Aumentar el flujo de solución orgánica: Otra alternativa para que el cobre contenido en la solución acuosa esté en contacto a una mayor cantidad de reactivo extractante es mediante el incremento de la relación de flujo orgánico/acuoso.
- Disminuir la acidez en la solución de PLS: Al realizar esto, se logra que el equilibrio de la reacción de extracción se vea favorecida, provocando en una mejora de extracción de cobre. La Figura 15 esquematiza cómo un incremento en el pH permite una mayor transferencia de cobre hacia el orgánico.

**Figura 15***Efecto del pH en el PLS*

*Nota:* Tomado de Copper leaching, solvent extraction and electrowinning technology, 2009

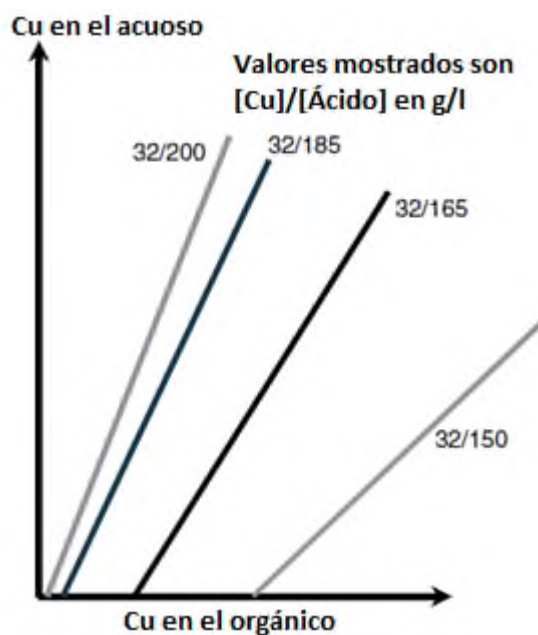
#### Optimización de la etapa de reextracción

Para optimizar la etapa de reextracción, es necesario centrarse en los parámetros que incrementen la transferencia de cobre del orgánico cargado al electrolito pobre, para obtener una solución de electrolito rico con alto contenido de cobre, entre ellos tenemos:

- Incremento de la acidez en el electrolito pobre: La curva de equilibrio de la etapa de reextracción se desplaza hacia la izquierda, lo que significa que el cobre remanente en el orgánico descargado es menor. La Figura 16 muestra cómo un incremento en la acidez de la solución acuosa permite una mayor reextracción de cobre.

**Figura 16**

*Efecto de la concentración de ácido en el electrolito pobre*

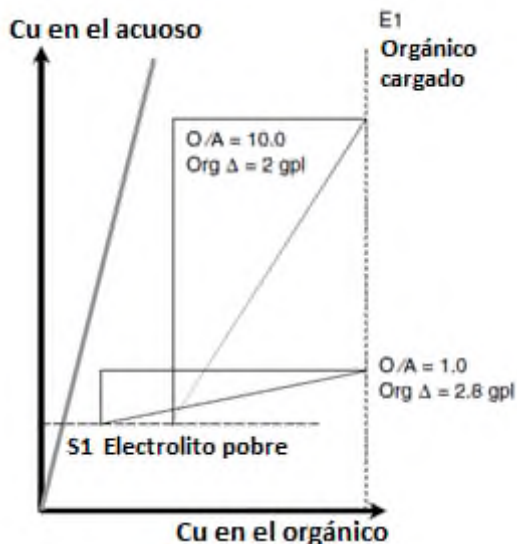


*Nota:* Tomado de Copper leaching, solvent extraction and electrowining technology, 2009

- Disminuir la relación de flujos O/A: Para conseguir esto, se eleva el flujo de solución acuosa, esto ocasiona una modificación en la curva de operación representada en la gráfica de McCabe Thiele, logrando que el contenido de cobre remanente en el orgánico descargado sea menor. La Figura 17 muestra cómo una menor relación O/A permite una mayor reextracción de cobre.

**Figura 17**

*Efecto del descenso de relación O/A en el orgánico transferido*



*Nota:* Tomado de Copper leaching, solvent extraction and electrowinning technology, 2009

- Etapa de lavado

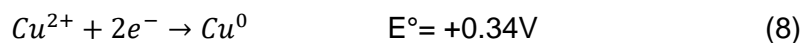
En algunas plantas de extracción por solvente se decide incluir una etapa de lavado luego de las etapas de extracción y antes de la etapa de reextracción, esto con la finalidad de remover los contaminantes que puedan estar presente en el arrastre de la fase orgánica y evitar que puedan llegar hasta la etapa de electroposición a través del electrolito. Entre los posibles contaminantes se tienen a los cloruros, nitratos, iones de hierro, manganeso o cobalto que puedan estar contenidos en la solución de PLS (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2011).

### **3.3.3. Etapa de electrodeposición**

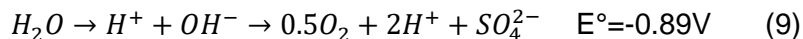
La etapa de electrodeposición es la última etapa del proceso hidrometalúrgico, en el cual ocurre la depositación del cobre metálico sobre un cátodo de acero inoxidable desde una solución rica en cobre debido al paso de una corriente eléctrica inducida, haciendo uso de ánodos insolubles de plomo (911Metallurgist, 2022).



Schlesinger et al. (2011) describen que las reacciones químicas involucradas en el cátodo son:

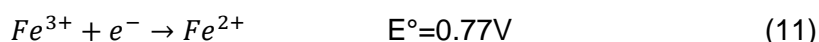
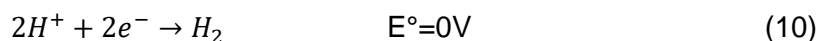


Mientras que la reacción en el ánodo es la descomposición del agua que forma oxígeno gaseoso y la liberación de iones hidrógeno.

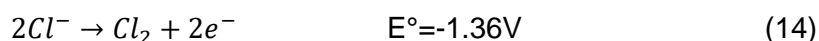
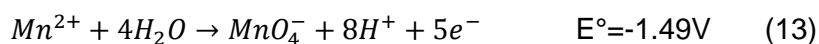
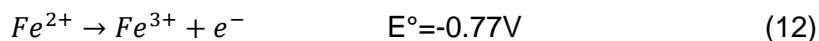


Estas dos reacciones nos ayudan a entender que en la etapa de EW se genera cobre metálico en el cátodo, oxígeno gaseoso en el ánodo y la regeneración de ácido sulfúrico en el electrolito.

Zenteno (2016) agrega que existen reacciones no deseadas en la etapa que consumen energía eléctrica, reduciendo la eficiencia de corriente. Entre estas reacciones tenemos las siguientes en el cátodo:



Mientras que en el ánodo tenemos las siguientes reacciones indeseadas:



Estas reacciones nos describen las reacciones que disminuyen la eficiencia de corriente en la etapa de electroobtención.

Schlesinger et al. (2011) detallan que la cantidad de masa de cobre depositada sobre la superficie de cobre está dada por la ley de Faraday.

$$m = \frac{M \times A \times t \times \epsilon}{n \times F} \quad (15)$$

Donde:

- m = Masa de cobre electrodepositada (g)
- M = Masa molar de cobre (63.55 g/mol)
- A = Amperaje (A)

- $\epsilon$  = Eficiencia de corriente (%)
- $n$  = Número de electrones involucrados en la electrodeposición
- $F$  = Constante de Faraday (96 485 A/mol)

La Ecuación 15 es ampliamente utilizada a diario para estimar el cobre depositado y poder determinar el momento en que los cátodos de cobre deben ser cosechados.

#### - Temperatura

La temperatura del electrolito tiene una gran influencia sobre el proceso de la electroobtención. Zenteno (2016) describe que el transporte de los iones ocurre mediante tres mecanismos:

- Migración, producido por la gradiente de potencial eléctrico.
- Difusión, producido por el gradiente de concentración de iones.
- Convección, generado por la diferencia de densidades de la solución.

Debido a esto, un aumento de la temperatura generará una mayor movilización de las especies iónicas, elevando los efectos del mecanismo de migración; por otro lado, incrementa la solubilidad del cobre en el electrolito, permitiendo generar una mayor diferencia de concentración, elevando los efectos del mecanismo de difusión; y finalmente, reduce la viscosidad de la fase acuosa, favoreciendo el fenómeno de convección. Beukes & Badenhorst (2009) mencionan que la temperatura más idónea de trabajo es en un intervalo entre 45 y 55°C.

Debido a que a la salida de la etapa de electrodeposición, el electrolito pobre sale con alta temperatura, se aprovecha esta energía térmica para calentar el electrolito rico entrante mediante un intercambiador de calor.

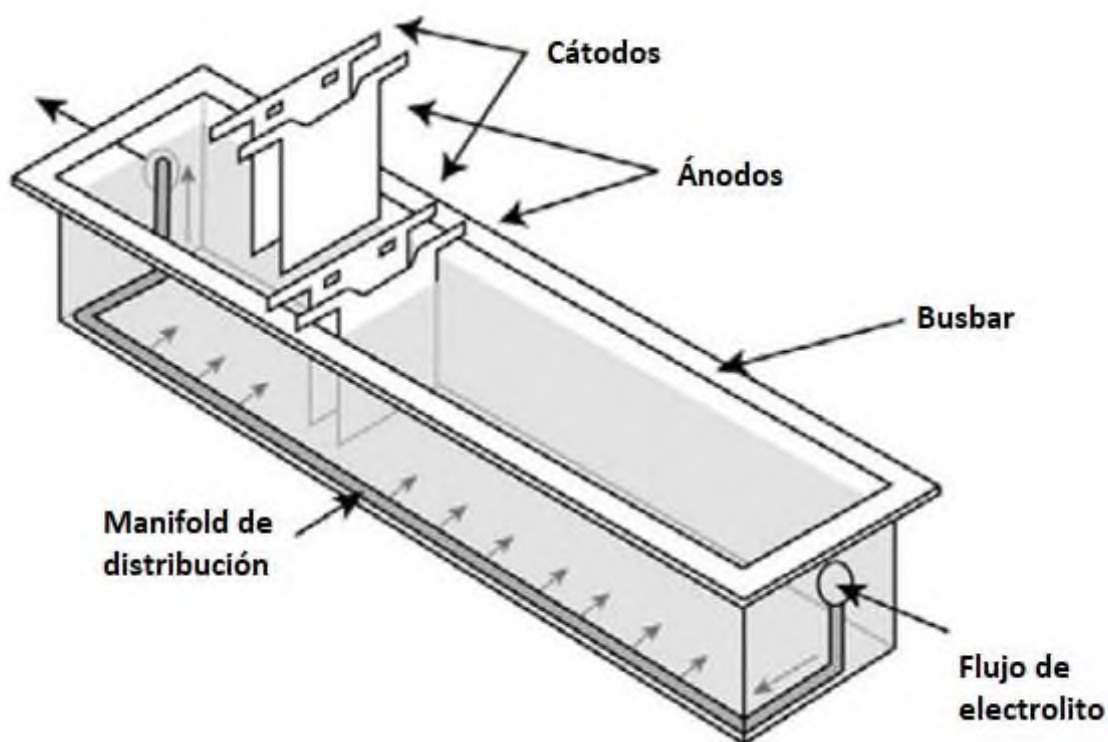
#### - Diseño de celda de electrodeposición

En las celdas actuales, los ánodos y cátodos son ubicados de manera alternada y el electrolito fluye a través de ellos con una velocidad específica típica de 0.08 m<sup>3</sup>/h por

metro cuadrado de área catódica (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2011). En la Figura 18 se muestra el esquema típico de una celda de electrodeposición, mostrando las posiciones alternadas entre cátodo y ánodo.

**Figura 18**

*Diseño de una celda de electrodeposición*



*Nota:* Tomado de Extractive Metallurgy of Copper (2011)

- Ánodos

Zenteno (2016) describe que los ánodos comerciales para la etapa de electrodeposición es principalmente una aleación de Pb-Ca-Sn. Schlesinger et al. (2011) mencionan que esta aleación le provee estabilidad y resistencia a la corrosión; además, añaden que sus dimensiones son menores que la de los cátodos para prevenir que ocurra deposición de cobre en los extremos laterales de los cátodos. En la Figura 19 se muestra una plancha de ánodo utilizada en la etapa de electrodeposición.

**Figura 19**

*Ánodo comercial de Pb-Ca-Sn*



*Nota:* Tomado de Extractive Metallurgy of Copper (2011)

- **Cátodos**

Los cátodos más utilizados son placas de acero inoxidable 316L, con un área de  $1\text{m}^2$  y deben presentar una rugosidad de  $0.16$  a  $0.6\ \mu\text{m}$  (Zenteno, 2016). En la Figura 20 se muestra una plancha de cátodo de acero inoxidable donde se depositará el cobre.

## Figura 20

Cátodo de acero inoxidable



*Nota:* Tomado de Extractive Metallurgy of Copper (2011)

- Densidad de corriente

Una densidad de corriente excesiva genera un depósito de cobre más rugoso y granulado generando un mayor grado de contaminantes (Schlesinger et al. 2011). Beukes & Badenhorst (2009) mencionan que la densidad de corriente puede variar entre 200 y 375 A/m<sup>2</sup>.

- Niebla ácida

Schlesinger et al. (2011) describen que las burbujas de oxígeno que son producidas por las reacciones químicas en el ánodo se elevan, emergen y erupcionan en la superficie de electrolito, en este trayecto transportan consigo ácido sulfúrico en forma de pequeñas

gotas, esto es conocido como niebla ácida. Este fenómeno genera un ambiente corrosivo, poniendo en peligro al medio ambiente y a la salud humana.

Para evitar esta condición, se toman ciertas medidas como una continua ventilación en el ambiente trabajo mediante extractores; además de ello, se agregan esferas de polipropileno de aproximadamente 20mm de diámetro sobre la superficie del electrolito como agentes de supresión de la niebla ácida.

- Reactivos químicos adicionados

En la etapa de electrodeposición se añaden reactivos químicos que favorezcan a un incremento en la calidad química y física de los cátodos (Schlesinger et al. 2011). Entre ellos tenemos:

- Sulfato de cobalto: La acción del sulfato de cobalto es darle más estabilidad a la capa de dióxido de plomo, al favorecer la formación de oxígeno gaseoso en lugar de la oxidación de plomo. La concentración de trabajo es en el rango de 100-200 ppm.
- Agente alisante: Tiene como función que la electrodeposición sea de manera más controlada y de esta manera evitar el atrapamiento de impurezas que puedan estar presentes en el electrolito.
- Agente supresor de niebla: Normalmente se utilizan agentes espumantes o surfactantes fluorocarbonados, cuya función es alterar las características del rompimiento de las burbujas producto de la afloración del gas oxígeno, reduciendo el atrapamiento de ácido sulfúrico en él.

### **3.4. Propuesta y contribuciones de su formación profesional**

#### **3.4.1. *Objetivos y justificación del uso de las técnicas propuestas***

##### Objetivos

- Asegurar la máxima eficiencia de recuperación de cobre soluble en ácido en la etapa de lixiviación.
- Asegurar la máxima transferencia de cobre en la etapa de extracción por solventes.
- Asegurar la máxima electrodeposición de cobre en la etapa de electrodeposición.

##### Justificación

La elección de estas técnicas fue debido a que brindan buenos resultados operativos, y han sido probados en otras empresas con similares características. Además de ello, han sido corroboradas a nivel laboratorio y nivel planta piloto antes iniciar las operaciones a nivel industrial, llegándose a la conclusión que los métodos escogidos son los adecuados para esta operación.

#### **3.4.2. *Cálculo y determinaciones de indicadores de gestión para evaluar y monitorear la propuesta***

Los cálculos elaborados para conseguir los parámetros de operación adecuados se encontraban integrados en algunos softwares especializados para estos procesos; sin embargo, en el presente trabajo se mencionarán los cálculos matemáticos involucrados en dichos softwares.

##### Determinación del amperaje mínimo al área de electrodeposición

Para la determinación del amperaje mínimo a utilizar el área de electrodeposición se debe partir conociendo lo siguiente:

- El flujo de masa cobre que ingresa al área de electrodeposición depende del flujo de masa de cobre que ingresa al área de extracción por solventes desde el área de lixiviación.
- La densidad de corriente no debe ser menor a 150 A/m<sup>2</sup> para evitar una adhesión excesiva del cobre depositado sobre la plancha de acero inoxidable.
- El área de electrodeposición de Marcobre cuenta con celdas de electrodeposición de 84 cátodos de acero inoxidable, cada uno con un área disponible de 1.1m<sup>2</sup> en cada cara.

El amperaje mínimo para emplear en Marcobre se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Densidad Corriente}_{min} = \frac{A_{min}}{2 \times 1.1 \times 84} \quad (16)$$

$$A_{min} = 27.7kA$$

Es importante conocer la aplicación de la Ecuación 16 para poder determinar cuánto es el mínimo amperaje al cual debe operar una planta de electrodeposición para evitar los problemas de despegue de los cátodos sobre las planchas de acero.

#### Determinación del amperaje para la electrodeposición

La intensidad de corriente que se debe inducir en el proceso de electrodeposición es determinada de dos maneras; la primera es mediante la transferencia de cobre proveniente de la etapa de extracción por solvente, y la segunda es mediante la concentración de cobre en el electrolito rico.

#### Cobre transferido por la etapa de extracción por solventes

El primer dato que se debe calcular es el corte de cobre a través del PLS, es decir, la cantidad de cobre que se transfiere desde el PLS hacia el electrolito, el cual es el resultado de la diferencia entre la concentración de cobre en el PLS y el cobre en el refino. En la Tabla 4 se muestran los cálculos intermedios para calcular el cobre transferido por el PLS.



**Tabla 4***Cobre total transferido por el PLS*

<b>Datos de entrada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Flujo PLS	800	m3/h
Cobre en PLS	7.4	g/l
Cobre en Refino	0.20	g/l
<b>Resultados</b>		
Eficiencia de extracción	97.3	%
Corte de Cobre	7.2	g/l
Cobre Transferido por el PLS	5.74	ton/h
Cobre Transferido por el PLS	68.83	ton/turno

Posteriormente, se calcula la cantidad de cobre que se pierde al momento de realizar las purgas de electrolito con la finalidad de reducir la concentración de contaminantes (hierro, cloro, manganeso) y, seguidamente; se determina la cantidad de cobre neto que se transfiere de la etapa de extracción por solventes. En la Tabla 5 se muestran los cálculos intermedios para el cálculo del cobre neto transferido por la SX.

**Tabla 5***Cobre neto transferido por la SX*

<b>Datos de entrada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Volumen de purga	10	m3/h
Cobre en Electrolito purgado	36.0	g/l
<b>Resultados</b>		
Masa de Cobre purgado	0.36	ton/h
Masa de Cobre purgado	4.32	ton/turno
Cobre Neto Transferido por la SX	5.38	ton/h
Cobre Neto Transferido por la SX	64.52	ton/turno

Finalmente, se utiliza este valor con la Ecuación 15 mostrada en la Sección 3.3.3 para despejar el amperaje a utilizar; en este caso, el resultado de dicha ecuación es de 43.3kA.

### Concentración de cobre en el electrolito rico

El segundo método toma como base el hecho que el electrolito pobre a la salida de la etapa de electrodeposición no debe ser menor a 38 g/l para evitar problemas de calidad catódica. Por ello, la masa de cobre depositada debe ser la cantidad de cobre transferido desde el electrolito rico hasta alcanzar una concentración de 38 g/l. En la Tabla 6 se muestran los cálculos intermedios para el cálculo de la masa neta de cobre depositado.

**Tabla 6**

#### *Masa de cobre electrodepositado*

<b>Datos de entrada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Cobre en ER	53.60	g/l
Cobre en EP	38	g/l
Flujo ER	360	m3/h
<b>Resultados</b>		
Corte Cu	15.6	g/l
Masa de cobre depositado	5.61	tn/h
Masa de Cobre purgado	0.36	ton/h
Masa neta de cobre depositado	5.25	tn/h

Finalmente, se utiliza este valor con la Ecuación 15 mostrada en la Sección 3.3.3 para despejar el amperaje a utilizar; en este caso, el resultado de dicha ecuación es de 42.3kA.

Ambos métodos nos otorgan valores distintos, se debe de seleccionar el menor valor para no consumir más cobre del inventario de las soluciones.

### Cantidad de volumen de extractante a adicionar

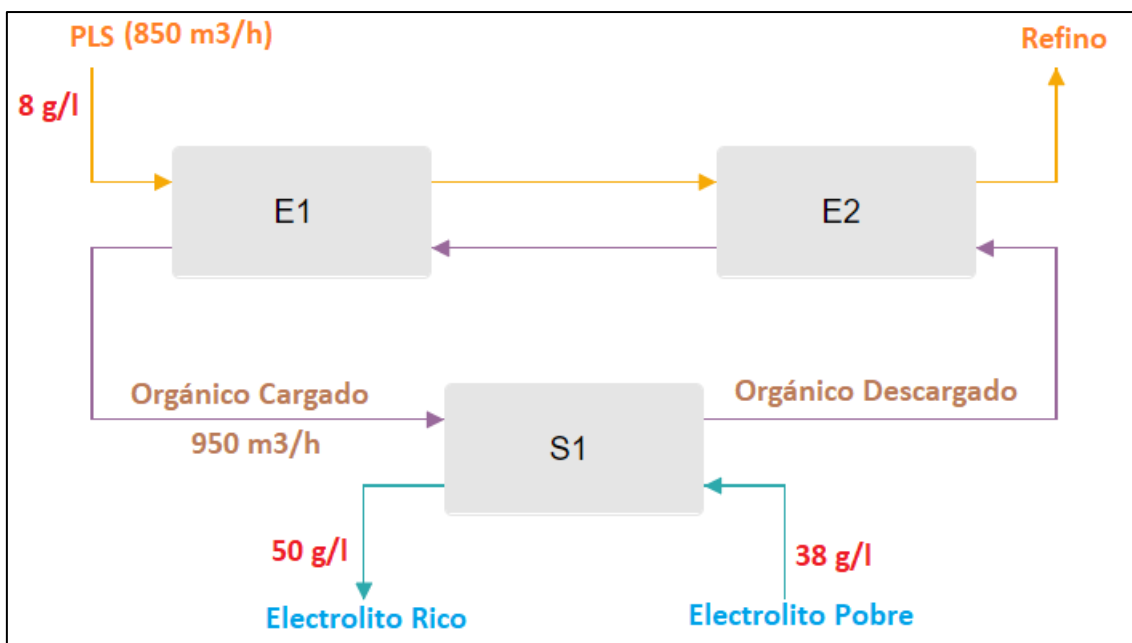
El primer paso para determinar el volumen de extractante que debe contener la solución orgánica es definir el porcentaje de eficiencia de extracción que deseamos tener en la etapa de extracción por solventes. Para ello, se realizará el siguiente ejercicio.

- Sea una eficiencia de extracción mínima de 92%.

- Se cuenta con un ingreso de PLS con a una concentración de 8 g/l y a un flujo de 850 m<sup>3</sup>/h.
- Se cuenta con un flujo de solución orgánica de 950 m<sup>3</sup>/h.
- El electrolito pobre a la salida del área de electrodeposición tiene una concentración de 38 g/l y deseamos cargarlo hasta 50 g/l en el área de extracción por solventes.
- La Figura 21 muestra la configuración de 2 etapas de extracción y una etapa de re-extracción que se cuenta.

**Figura 21**

*Diagrama de extracción por solventes*



*Nota:* Elaboración propia

Ya teniendo definido el porcentaje de eficiencia de extracción deseado, se puede calcular la concentración de cobre en el refino, multiplicando la concentración de cobre en el PLS por la eficiencia de extracción; en este caso, el refino debe salir con una concentración de 0.64 g/l.

Conociendo los flujos de la solución orgánica (950 m<sup>3</sup>/h) y la solución acuosa (850 m<sup>3</sup>/h), podemos calcular la pendiente de la recta de operación en el diagrama de McCabe

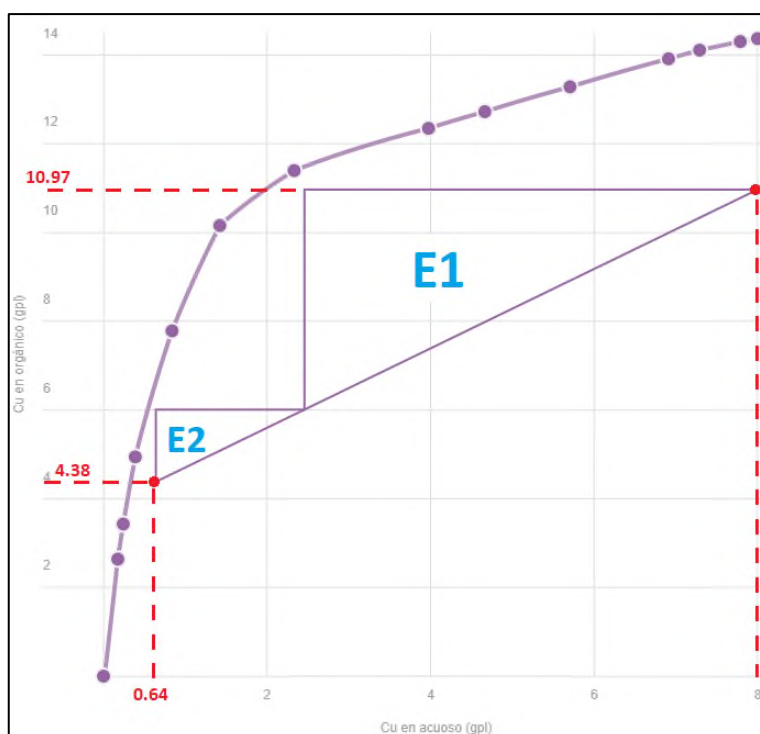
Thiele. En la Figura 22 se muestra la recta de operación con las dos etapas de extracción (E1 y E2). A parte de ello, sabiendo que en la industria se tiene un valor normal de cobre en el orgánico descargado de aproximadamente 4.5 g/l, se puede construir la recta de operación en el gráfico.

Posterior a ello, se compara con las curvas de equilibrio disponible a diferentes porcentajes en volumen de extractante; para ello, es necesario realizar en laboratorio diversas isothermas de extracción y re-extracción, que vienen siendo las curvas de equilibrio para el método de McCabe Thiele.

En este caso, la curva que permite una eficiencia de extracción de 92% contando con dos etapas en serie es para una solución orgánica con una concentración de 26% de extractante.

**Figura 22**

*Diagrama McCabe Thiele de la etapa de extracción*

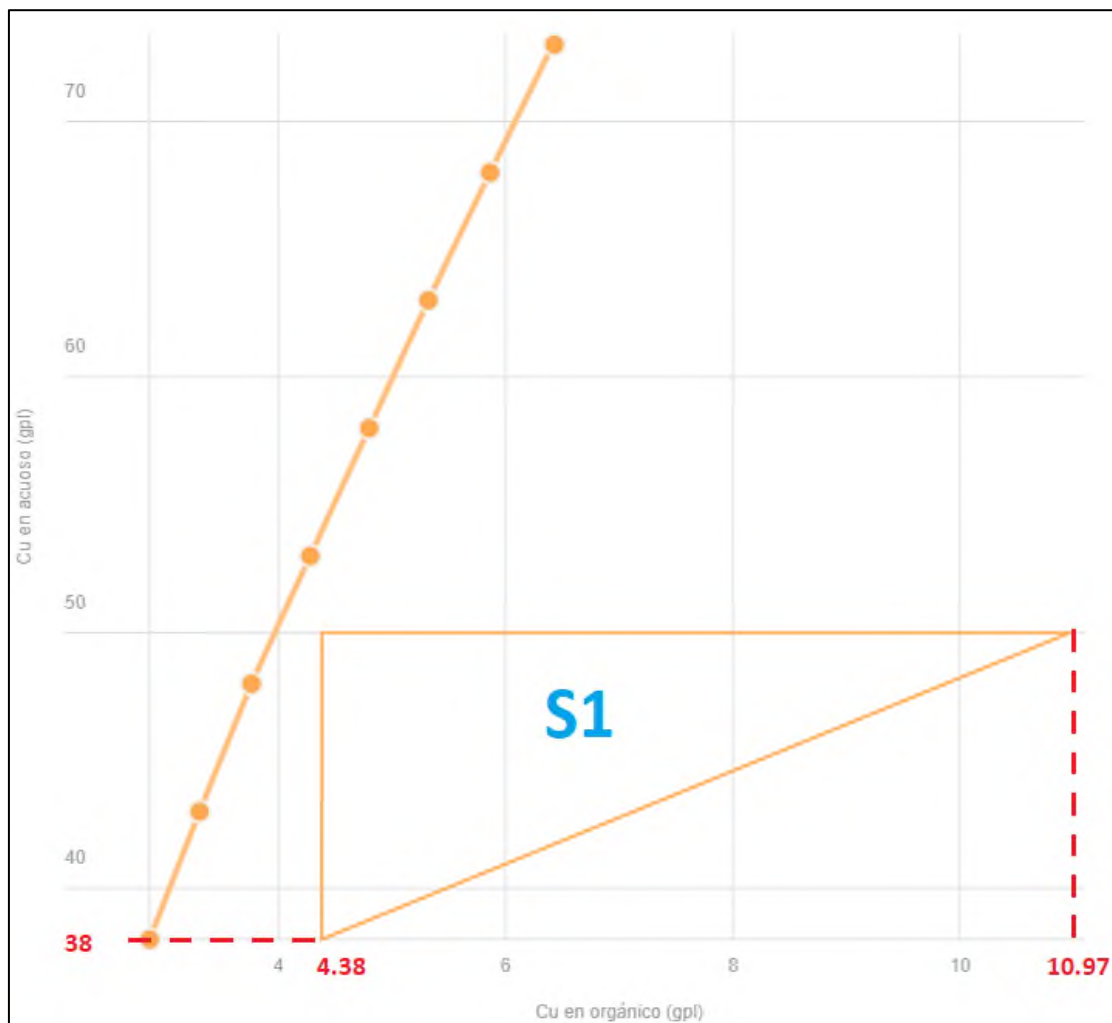


En paralelo, se construye el diagrama de McCabe Thiele para la etapa de re-extracción, de tal manera que se cumpla las concentraciones definidas para el electrolito pobre y electrolito rico.

En el caso mostrado en la Figura 23, el resultado del ejercicio nos otorga la pendiente de la recta de operación, lo que nos permite calcular el flujo al cual debemos bombear el electrolito para alcanzar los valores establecidos.

**Figura 23**

*Diagrama McCabe Thiele para la etapa de re-extracción*



Antes de adicionar el extractante a la planta, debemos conocer el porcentaje en volumen del extractante que se encuentra en la planta; para ello, se debe realizar el análisis conocido como *Carga Máxima* a la solución orgánica, cuyo objetivo es la determinación del porcentaje en volumen de extractante actual en el orgánico de planta.

Una vez determinado el porcentaje en volumen de extractante real y el requerido, debemos multiplicar esta diferencia con el inventario total de solución orgánica en la planta

para conocer el volumen que se debe adicionar; para ello, se debe realizar un inventario del volumen de orgánico en toda la planta (tanques, tuberías, canaletas, sedimentadores, agitadores).

#### Producción estimada del mes

Para la producción estimada del mes se necesita cuatro parámetros de entrada.

- Throughput: Capacidad de mineral alimentado a la planta (tn/h)
- Disponibilidad mecánica/eléctrica: Porcentaje del tiempo en el mes en que los equipos no se encuentran intervenidos por mantenimiento mecánico y/o eléctrico. Este valor es definido por el área de mantenimiento.
- Utilización total: Porcentaje del tiempo en el mes en que los equipos no se encuentran detenidos por alguna necesidad operativa. Este valor es definido por el área de operaciones.

El primer paso es determinar el número de horas disponibles en el mes a evaluar.

Siendo el caso del mes de enero, se determina de la siguiente manera.

- Sea la disponibilidad del mes un 80%
- Sea la utilización total del mes un 85%

$$\text{Horas Disponibles} = 31d \times 24 \frac{h}{d} \times 80\% \times 85\% = 505.9h \quad (17)$$

Finalmente, se multiplica el número de horas disponibles por el throughput para calcular el tonelaje a procesar durante el mes.

- Sea un throughput de 1600 tn/h

$$\text{Tonelaje} = 1600 \frac{tn}{h} \times 505.9h = 809,440 \text{ tn} \quad (18)$$

#### Determinación de la recuperación en lixiviación

Para el cálculo de la recuperación, debemos conocer primero la cantidad de cobre aportado al sistema, para ello es necesario tomar una muestra representativa (mediante una serie de pasos de homogenizado y cuarteo) del mineral de cabeza ingresado al

sistema y enviarlo a analizar al laboratorio químico. En la Tabla 7 se muestra un ejemplo de resultados de análisis de contenido de cobre.

**Tabla 7**

*Análisis químico del mineral de cabeza ingresado al sistema*

Toneladas	%CuT	%CuSAc	%CuSCN	%CuR
14,085	0.658	0.548	0.037	0.284

*Nota:* %CuT (cobre total); %CuSAc (cobre soluble en ácido); %CuSCN (cobre soluble en cianuro); %CuR (cobre residual)

A continuación, se calcula el cobre total ingresado al sistema de la siguiente manera:

$$CuT_{cabeza} = Ton \times \%CuT = 92.68tn \quad (19)$$

Luego de haber culminado su ciclo de lixiviación, es necesario realizar un muestreo representativo (mediante una serie de pasos de homogenizado y cuarteo) de los rípios para calcular el cobre total que se pierde en ellos. En la Tabla 8 se muestra los resultados del análisis por laboratorio químico.

**Tabla 8**

*Análisis químico de los rípios*

%CuT	%CuSAc	%CuSCN	%CuR
0.187	0.105	0.016	0.062

A continuación, se calcula el cobre total desechado en los rípios. Por casos previos analizados, se ha observado que luego de la lixiviación, el peso de los rípios presenta una pérdida del 2% del peso original.

$$CuT_{rípios} = Ton \times 98\% \times \%CuT = 25.81tn \quad (20)$$

Conociendo ambos valores, se procede a calcular el aporte de cobre al sistema.

$$Aporte\ de\ Cu = CuT_{cabeza} - CuT_{rípios} = 66.87tn \quad (21)$$

Finalmente, el porcentaje de recuperación se puede expresar de dos maneras:

$$\%Recuperación_{CuT} = \frac{Aporte\ de\ Cu}{CuT_{cabeza}} = 72.15\%$$

$$\%Recuperación_{CuSAC} = \frac{Aporte\ de\ Cu}{CuSAC_{cabeza}} = 86.63\%$$

### **3.4.3. Análisis e interpretación de resultados y aportes técnicos de la propuesta de solución**

#### Lixiviación

En el área de lixiviación se realizó la estimación de la cinética de lixiviación de tipos de mineral; esto con la finalidad de poder predecir el porcentaje de recuperación de cobre obtenido dependiendo de las características del mineral.

En la Tabla 9 se muestra una parte de la plantilla de control utilizada durante el muestreo de los reboses de una batea.



Tabla 9

## Resultados de lixiviación de una batea

Tiempo parcial	Tiempo acum	Flujo RAFF	Volumen	Volumen acum	Cu+2 g/l	Cu+2 g/l	delta Cu+2	Recuperación 2 de Cu				
hr	hr	m3/hr	m3	m3	PLS	RAFF	gpl	Tiempo Acc	Kg acum	% CuT	%CuSAc	
0.00	0	848	0	0		4.69	-4.69	-	-	-	-	
0.33	0.33	853	284	284		4.58	-4.58	-	2.67	- 1,303	- 1.46	- 1.7
0.33	0.67	862	287	572		4.60	-4.60	-	2.33	- 2,625	- 2.94	- 3.5
0.33	1.00	858	286	858		4.29	-4.29	-	2.00	- 3,852	- 4.32	- 5.1
0.50	1.50	852	426	1,283		4.36	-4.36	-	1.67	- 5,708	- 6.39	- 7.6
0.50	2.00	852	426	1,709		4.18	-4.18	-	1.17	- 7,486	- 8.39	- 9.9
0.67	2.67	854	570	2,279		4.01	-4.01	-	0.67	- 9,769	- 10.94	- 13.0
0.00	0.00	854	0	-	7.47	4.01	3.46	-	-	- 9,769	- 10.94	- 13.0
0.17	0.17	843	141	141	7.69	3.97	3.72	0.17	- 9,247	- 10.36	- 12.3	
0.17	0.33	854	142	283	8.56	3.94	4.62	0.33	- 8,588	- 9.62	- 11.4	
0.17	0.50	847	141	424	8.85	3.91	4.94	0.50	- 7,891	- 8.84	- 10.5	
0.17	0.67	843	141	565	8.93	3.83	5.10	0.67	- 7,174	- 8.04	- 9.5	
0.17	0.83	847	141	706	8.92	3.80	5.12	0.83	- 6,452	- 7.23	- 8.6	
0.17	1.00	852	142	848	8.77	3.77	5.01	1.00	- 5,741	- 6.43	- 7.6	
0.50	1.50	851	426	1,274	8.17	3.73	4.43	1.50	- 3,854	- 4.32	- 5.1	
0.50	2.00	854	427	1,700	8.31	3.67	4.64	2.00	- 1,875	- 2.10	- 2.5	
0.50	2.50	844	422	2,122	7.97	3.56	4.41	2.50	- 16	- 0.02	- 0.0	
0.50	3.00	844	422	2,544	7.55	3.54	4.01	3.00	1,676	1.88	2.2	
1.00	4.00	871	871	3,416	7.32	3.39	3.93	4.00	5,099	5.71	6.8	
1.00	5.00	877	877	4,293	6.64	3.26	3.38	5.00	8,062	9.03	10.7	
1.00	6.00	885	885	5,178	6.17	2.94	3.23	6.00	10,919	12.23	14.5	
1.00	7.00	880	880	6,058	4.97	2.77	2.20	7.00	12,857	14.40	17.1	
1.00	8.00	880	880	6,938	4.57	2.57	2.00	8.00	14,617	16.38	19.4	
1.00	9.00	876	876	7,814	4.56	2.36	2.20	9.00	16,546	18.54	21.9	
1.00	10.00	885	885	8,698	4.10	2.24	1.86	10.00	18,195	20.38	24.1	
1.00	11.00	876	876	9,575	3.68	2.07	1.61	11.00	19,605	21.96	26.0	
1.00	12.00	880	880	10,454	3.35	1.99	1.36	12.00	20,801	23.30	27.6	
2.00	14.00	903	1807	12,261	3.05	1.79	1.27	14.00	23,086	25.86	30.6	
2.00	16.00	915	1830	14,092	2.80	1.63	1.17	16.00	25,228	28.26	33.5	
2.00	18.00	923	1846	15,938	2.34	1.47	0.87	18.00	26,829	30.06	35.6	
2.00	20.00	917	1833	17,771	2.13	1.37	0.76	20.00	28,224	31.62	37.4	
2.00	22.00	918	1835	19,606	2.08	1.37	0.71	22.00	29,527	33.08	39.2	
2.00	24.00	841	1682	21,288	1.83	1.34	0.49	24.00	30,353	34.00	40.3	
4.00	28.00	880	3521	24,809	1.73	1.30	0.43	28.00	31,859	35.69	42.3	
4.00	32.00	875	3499	28,308	1.82	1.25	0.57	32.00	33,850	37.92	44.9	
4.00	36.00	897	3589	31,896	1.84	1.17	0.67	36.00	36,258	40.62	48.1	
4.00	40.00	803	3211	35,108	1.49	0.77	0.72	40.00	38,564	43.20	51.2	
4.00	44.00	782	3128	38,236	1.16	0.73	0.43	44.00	39,906	44.71	52.9	
4.00	48.00	445	1779	40,015	1.14	0.71	0.44	48.00	40,680	45.57	54.0	
4.00	52.00	794	3177	43,193	0.89	0.59	0.31	52.00	41,649	46.66	55.3	
4.00	56.00	799	3196	46,389	0.87	0.47	0.40	56.00	42,937	48.10	57.0	
4.00	60.00	819	3277	49,665	0.72	0.46	0.26	60.00	43,792	49.06	58.1	
4.00	64.00	761	3045	52,710	0.61	0.38	0.23	64.00	44,496	49.85	59.0	
4.00	68.00	942	3766	56,476	0.40	0.14	0.26	68.00	45,486	50.96	60.3	
4.00	72.00	966	3862	60,339	0.40	0.15	0.25	72.00	46,452	52.04	61.6	
4.00	76.00	964	3858	64,196	0.34	0.15	0.19	76.00	47,200	52.88	62.6	
4.00	80.00	966	3864	68,061	0.33	0.14	0.19	80.00	47,927	53.69	63.6	
4.00	84.00	962	3849	71,910	0.29	0.14	0.16	84.00	48,531	54.37	64.4	
4.00	88.00	969	3877	75,787	0.28	0.13	0.15	88.00	49,120	55.03	65.2	
4.00	92.00	965	3860	79,647	0.27	0.12	0.14	92.00	49,676	55.65	65.9	
0.67	92.67	968	645	80,293	0.26	0.11	0.14	92.67	49,769	55.76	66.0	

Esta actividad comenzó con el muestreo del mineral de cabeza ingresado a la batea en estudio. Luego de realizar el respectivo procedimiento de homogenizado y cuarteo del

mineral, se envió a analizar a laboratorio químico para su análisis. En la Tabla 10 se muestra los resultados del análisis químico del mineral de cabeza.

**Tabla 10**

*Ley de cabeza del mineral estudiado*

<b>CuT</b>	<b>CuSAcl</b>	<b>CuSCN</b>	<b>CuR</b>
<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
0.611	0.516	0.026	0.051

Luego de haber cargado la batea con el mineral, se comenzó a muestrear las soluciones RAFF con que se alimentó a la batea y las soluciones de PLS en el rebose de estas.

Cada uno de estos muestreos fueron enviados a analizar a laboratorio químico para registrar su concentración de cobre.

De la Tabla 9, las primeras 2.67 horas corresponden al tiempo de inundación; es decir, se ingresa solución RAFF a la batea, pero aún no se obtiene solución PLS en el rebose; por ello, el delta de  $\text{Cu}^{2+}$  entre y el porcentaje de recuperación es negativo, ya que se ingresa cobre al sistema, pero no se obtiene un producto.

Pasada las 2.67 horas, se inicia el rebose de la solución PLS y los valores de delta de  $\text{Cu}^{2+}$  entre el PLS y RAFF son positivos.

Luego de terminar con la lixiviación, se procedió a muestrear los ripios, y nuevamente se homogenizó y cuarteó para analizar las leyes. En la Tabla 11 se muestran los resultados del análisis químico de los ripios.

**Tabla 11**

*Ley de ripios del mineral estudiado*

<b>CuT</b>	<b>CuSAcl</b>	<b>CuSCN</b>	<b>CuR</b>
<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
0.304	0.222	0.018	0.043

Esta actividad se realizó para varios tipos de minerales, cada uno con un comportamiento diferente. En la Tabla 12 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de la prueba. Se puede determinar que los minerales catalogados como OXI B y OXI D mostraron una cinética de lixiviación mayor que los otros dos tipos de minerales, por ello se obtuvo una mayor recuperación en un período de lixiviación similar.

**Tabla 12**

*Resultados de porcentaje de recuperación por tipo de mineral*

Batea	Stock	Ley Cabeza				Ley Ripios			Recuperación CuSAc(%)	
		Peso (TMS)	CuTot (%)	CuSAc (%)	CuSCN (%)	CuTot (%)	CuSAc (%)	CuSCN (%)	Sólidos	Líquidos
Batea 15	OXI A	14530	0.713	0.605	0.05	0.34	0.23	0.05	63.1	71.4
Batea 01	OXI A	14939	0.611	0.516	0.051	0.21	0.16	0.02	60.7	66.9
Batea 03	OXI B	14328	0.563	0.473	0.037	0.19	0.13	0.02	79.7	86.3
Batea 04	OXI B	14475	0.493	0.405	0.048	0.17	0.1	0.03	80.1	86.2
Batea 06	OXI D	14364	1.223	0.89	0.262	0.48	0.35	0.04	84.7	87.1
Batea 07	OXI C	13833	0.523	0.452	0.018	0.27	0.2	0.01	57.5	55.4

De la Figura 24 a la Figura 27, se muestra la cinética de lixiviación determinada a través de las soluciones RAFF y PLS, la recuperación de estas gráficas fue determinada como se mostró en la Tabla 9.

Sin embargo, este cálculo solo nos permite calcular el perfil de la cinética de recuperación, ya que el valor a considerar debe ser la recuperación a través de los sólidos; es decir, considerando la ley de cabeza y la ley de ripios, de la manera mostrada luego de presentar la Tabla 11.

Figura 24

Cinética de lixiviación - OXI A

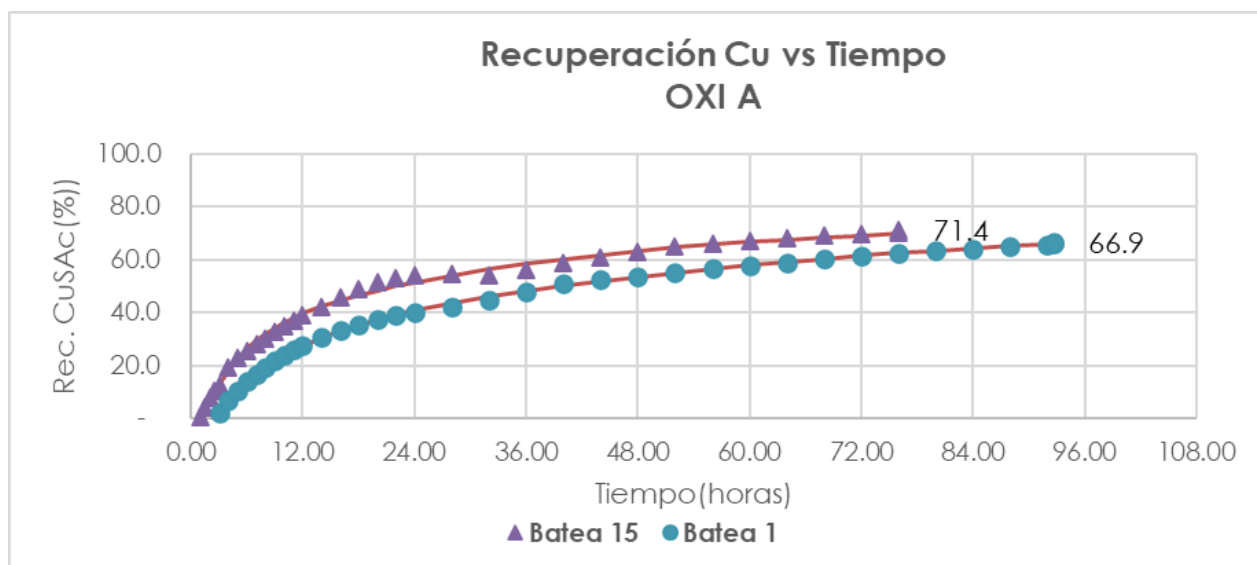


Figura 25

Cinética de lixiviación - OXI B

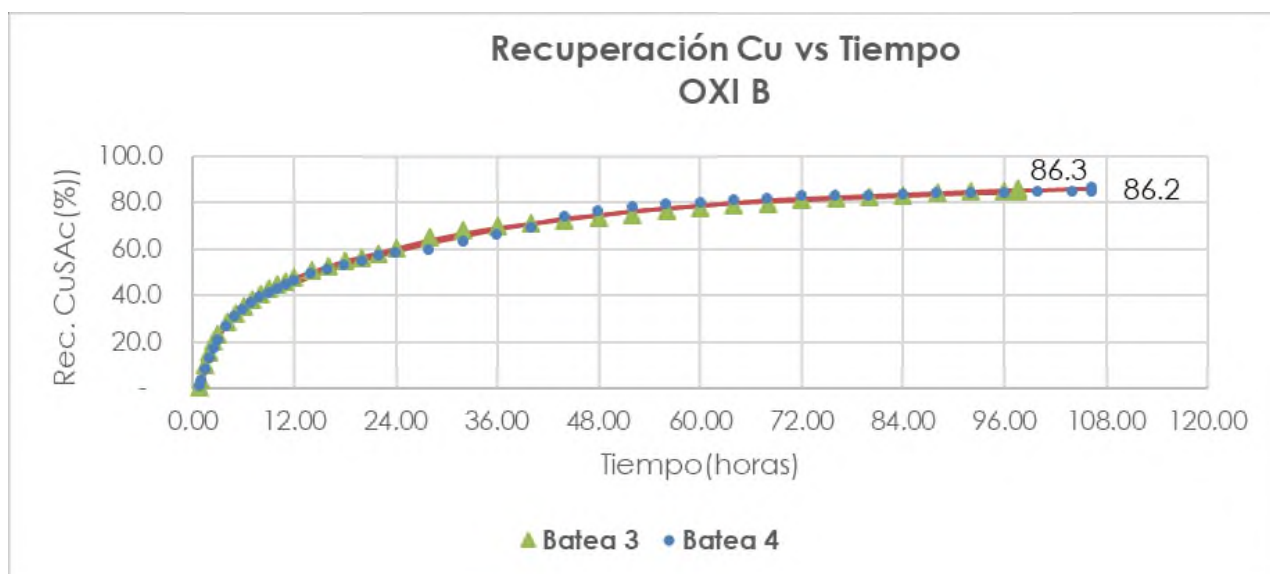


Figura 26

Cinética de lixiviación - OXI C

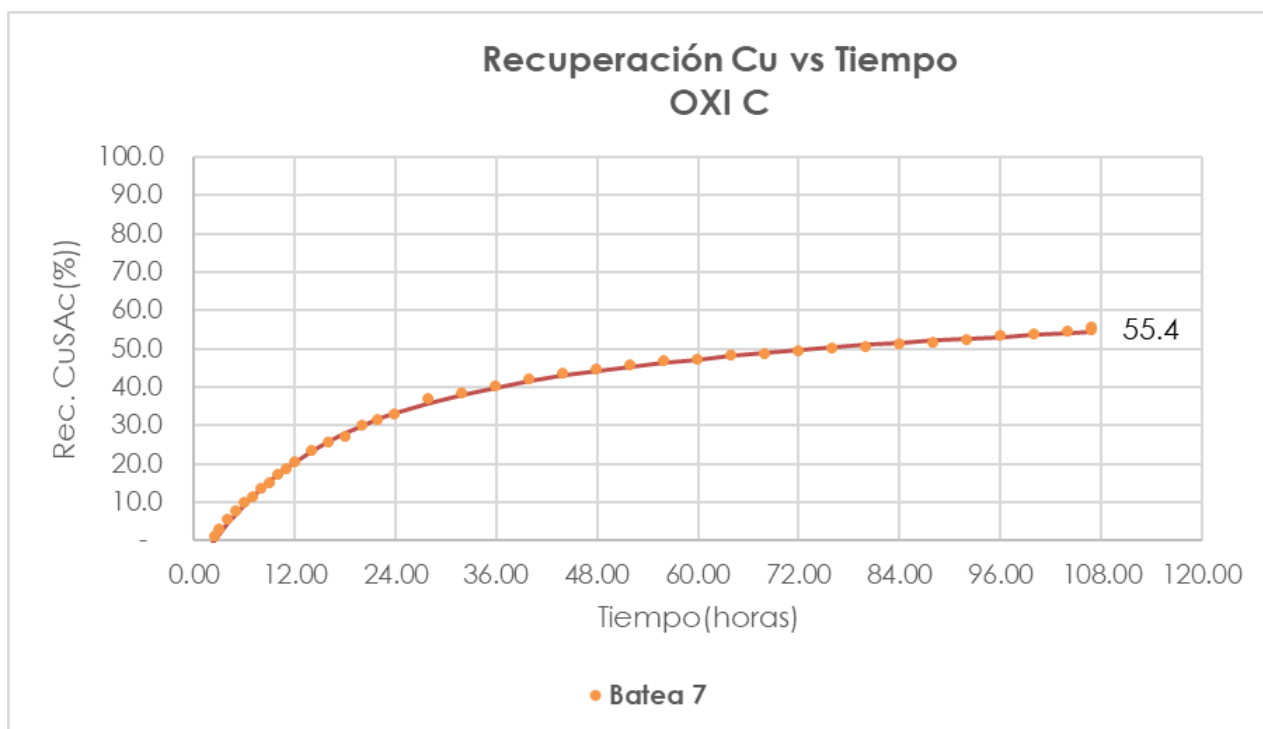
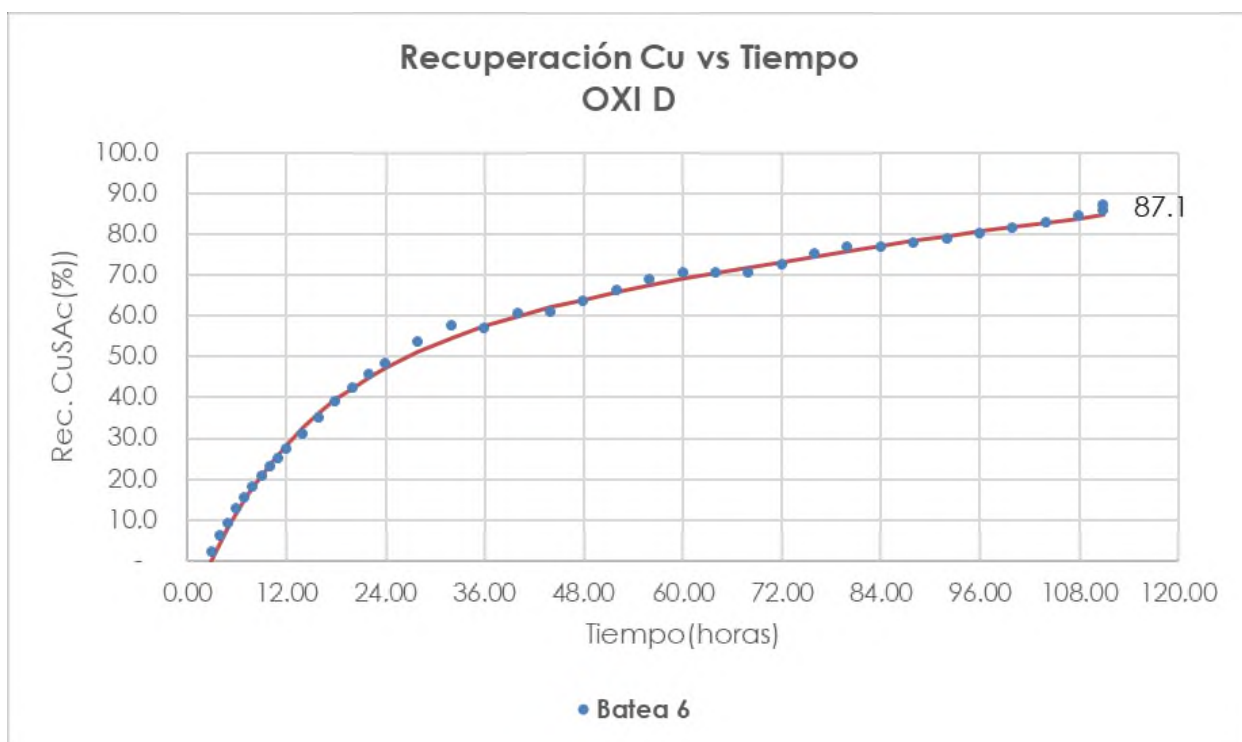


Figura 27

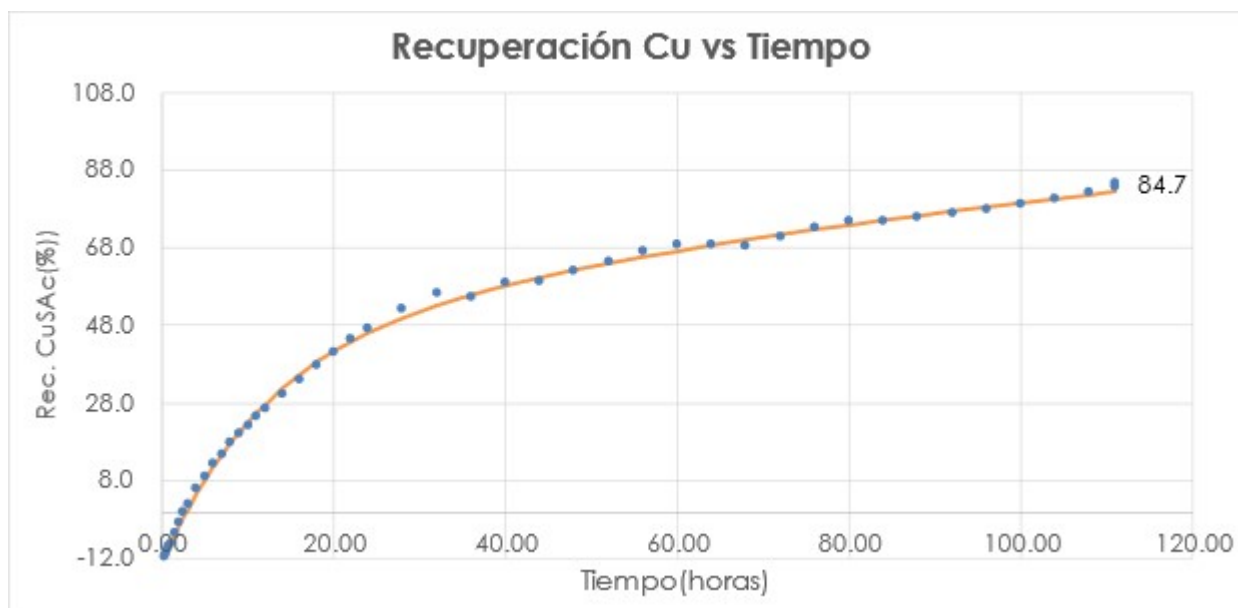
Cinética de lixiviación - OXI D



Tomando el caso del mineral catalogado como OXI D; se toma el perfil mostrado en la Figura 27 y se ajusta el resultado final al resultado obtenido por sólidos, según la Tabla 12, donde se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 28.

**Figura 28**

*Cinética de lixiviación de OXI D ajustada*



Para el modelamiento de la cinética de lixiviación del mineral catalogado como OXI D, se intentó ajustar a la Ecuación 4 mostrada en la Sección 3.3.1; sin embargo, no se lograba un ajuste muy cercano, por lo que se optó por realizar una variación a dicha ecuación, obteniendo el siguiente modelo:

$$\%Rec = 56.50 \times (1 - e^{-0.08160 \times T_{Lix}}) + 82.18 * (1 - e^{-0.00581 \times T_{Lix}}) - 13.1 \quad (22)$$

Donde:  $T_{LIX}$  es el tiempo acumulado de lixiviación en horas

#### Extracción por solventes

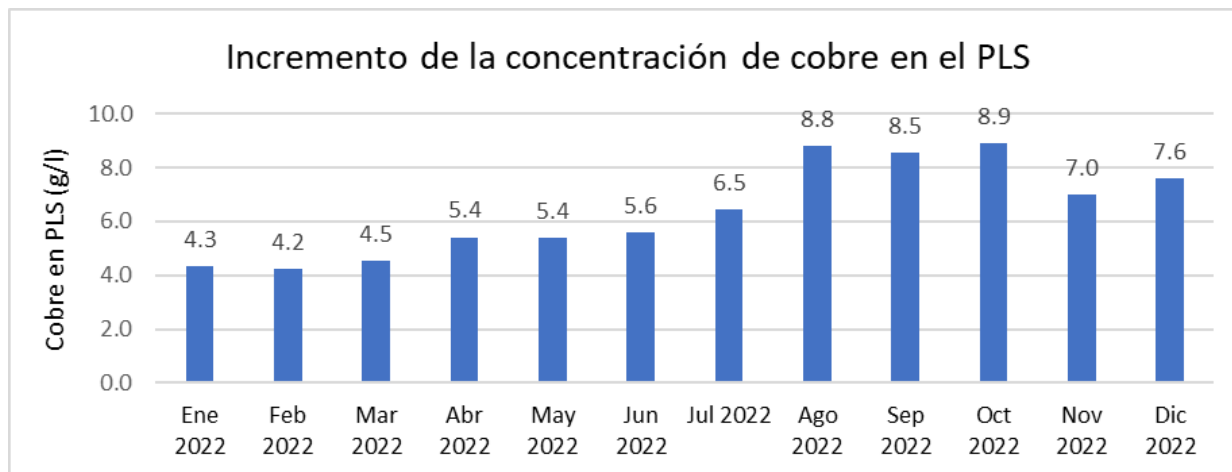
Por otro lado, en el área de extracción por solventes se determinó de manera continua la ley de cobre en el PLS luego del arranque de la planta el año 2021.

En la Figura 29 se muestra el promedio mensual del contenido de cobre en el PLS que alimentó al área de extracción por solventes durante el año 2022; el incremento se

debió al ramp-up de la planta luego de haber iniciado operaciones en el 2021 hasta alcanzar los valores de diseño.

**Figura 29**

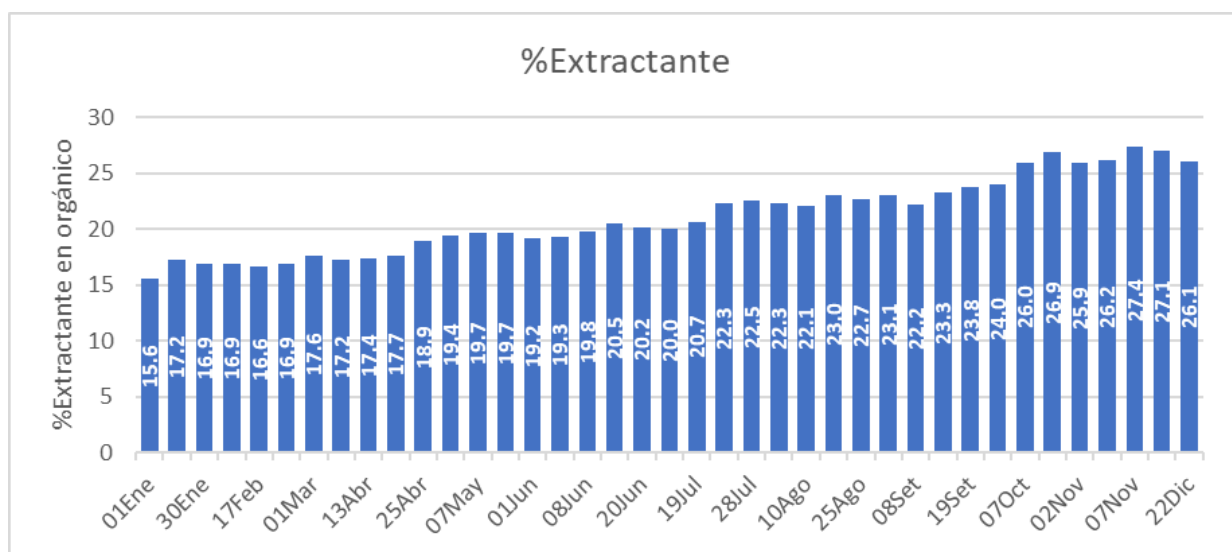
*Incremento de la concentración de cobre en el PLS durante el 2022*



Este monitoreo constante se realizó con la finalidad de determinar el porcentaje de extractante que debe contener la solución orgánica para obtener una eficiencia de extracción en el área de extracción por solventes superior a 90%; para ello se determinó el porcentaje de extractante de la manera descrita en la Sección 3.4.2.

**Figura 30**

*Incremento del porcentaje de extractante en el orgánico durante el 2022*



En la Figura 30 se muestra que el porcentaje de extractante incrementó de 15.6% a 26.1% en todo el año 2022, esto debido al incremento en la ley de cobre en el PLS, por lo que era necesario incrementar el extractante para mantener una alta eficiencia de extracción en el área de extracción por solventes.

#### **3.4.4. Evaluaciones y decisiones tomadas**

Para el caso del área de lixiviación, la

Figura 26 nos muestra que el mineral catalogado como OXI C presenta una cinética de lixiviación muy baja, por lo que se decidió solicitar al área de planeamiento mina que no realice envíos del mineral tipo OXI C hasta realizar las pruebas necesarias para conseguir un modelo de recuperación tras realizar un blending (mezcla) del mineral tipo OXI C con los otros tipos de minerales.

El proceso de blending consiste en realizar mezclas entre dos o más tipos de mineral, ya sea para aumentar o disminuir alguna característica de ellos.

Para nuestro caso, fue necesario plantear pruebas en columna para determinar el mejor porcentaje de blending entre el mineral tipo OXI A y C con los otros tipos de mineral, esto a fin de evitar porcentajes de recuperación tan bajos en comparación con otros tipos de minerales.

Se diseñaron las pruebas para ser realizadas en columnas controladas en laboratorio, mezclando en diferentes proporciones los minerales tipo OXI A y C (los minerales con menor cinética de recuperación) con los minerales OXI B y D (minerales con mayor cinética de recuperación).

Estas pruebas están contempladas ser realizadas en el transcurso del año 2023; mientras tanto, dichos tipos de minerales no están siendo ingresados a la planta de lixiviación.

Para el caso del área de extracción por solventes, dependiendo de la concentración de PLS ingresado al área de extracción por solventes, se decidía la cantidad de extractante



que se debía añadir al sistema. Adicionalmente, debido a que el reactivo solvente está en constante evaporación, fue necesario programar continuamente la medición de carga máxima, para calcular también la reposición de diluyente con la finalidad de mantener el porcentaje de extractante en el valor deseado.

#### ***3.4.5. Informes o reportes presentado como resultado de las actividades realizadas***

En el Anexo 6 se muestran las portadas de algunos reportes, mas no los documentos completos por confidencialidad de la empresa.

## **Capítulo IV. Discusión de resultados e implicancias**

### **4.1. Contribuciones al desarrollo de la empresa**

Durante mi período de trabajo en esta empresa, he podido contribuir de manera constante en varios aspectos de la supervisión; los dos puntos más resaltantes a mencionar son los descritos a continuación:

- Participación constante en el desarrollo de las pruebas de lixiviación para determinar la cinética de lixiviación de los minerales ingresados a la planta de óxidos.
- Elaboración del procedimiento de determinación del inventario de orgánico de la planta de SX para la determinación del volumen de extractante requerido para asegurar la eficiencia de extracción deseada.

### **4.2. Impacto de la propuesta**

En el área de lixiviación, estas pruebas evidenciaron la necesidad de realizar más pruebas de lixiviación para el mineral que aún no se conoce en su totalidad su cinética de lixiviación, y de esa manera no perder cobre en los rípios; por otro lado, en el área de extracción por solventes, el control continuo del porcentaje de extractante añadido considerando la ley de cobre en la solución de PLS, ayudó a disminuir los gastos de consumo de reactivo extractante, siendo este uno de los reactivos con los costos más elevados.

## Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- El mineral catalogado como OXI D presentó la cinética de lixiviación más rápida, con una recuperación de cobre soluble en ácido de 87.1% para un tiempo de lixiviación de 108 horas; seguido del mineral catalogado como OXI B con una recuperación de cobre soluble en ácido de 86.3% para un tiempo de lixiviación de 108 horas, mientras que el mineral OXI C presentó la cinética de lixiviación más baja, con una recuperación de cobre soluble en ácido de 55.4% para un tiempo de lixiviación de 108 horas, por lo que se necesita realizar un blending con otro tipo de mineral para poder ingresar a la planta de procesamiento.
- El aumento de la ley de cobre en el PLS ingresado al área de extracción por solventes durante el año 2022 fue de 4.3 g/l en enero a 7.6 g/l en diciembre, requiriendo durante este periodo el aumento del porcentaje de reactivo extractante de manera progresiva desde 15.6 a 26.1%v/v para asegurar que la eficiencia de extracción sea mayor a 90%.

### 5.2. Recomendaciones

- Plantear constantemente pruebas de cinética lixiviación para cada tipo de mineral que pueda ingresar de mina, esto a fin de evitar el procesamiento de minerales que presentan una mayor dificultad de lixiviación.
- Planificar una verificación del porcentaje en volumen del extractante en la solución orgánica para que se mantenga en el valor deseado para asegurar la eficiencia de extracción deseada. Se recomienda realizar cada semana debido a que la evaporación del reactivo solvente puede variar su valor, así como la degradación del orgánico debido a rayos UV o a contactos con altos niveles de acidez.

## Capítulo VI. Referencia Bibliográfica

- 911Metallurgist. (1 de Diciembre de 2022). *911 Metallurgist*. Obtenido de 911 Metallurgist:  
<https://www.911metallurgist.com/electrowinning/>
- Apua, C., Kime, M.-B., & Mukuna, M. (2013). *A study of leaching of copper oxide ore by sulphuric acid*. The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- Aydin, B., & Gül, A. (2021). Kinetic modelling and optimization of flotation process of electrum. *Physicochem. Probl. Miner. Process*, 57(6), 81-82. doi:10.37190/ppmp/142895
- Beckel, J. (2000). *El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile*. CEPAL.
- Beukes, N., & Badenhorst, J. (2009). *Copper electrowinning: theoretical and practical design*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Cáceres, G. (2016). *Hidrometalurgia avanzada*. Chile: Universidad Andrés Bello.
- Cruz, E. (21 de Mayo de 2021). *Rumbo Minero*. Obtenido de Rumbo Minero:  
<https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/ademas-de-quellaveco-y-mina-justa-cuales-son-los-proyectos-mineros-greenfield-mas-grandes-de-peru/>
- Glave, M., & Kuramoto, J. (2007). *La minería peruana: lo que sabemos y lo que aún nos falta por saber*. GRADE Group for the Analysis of Development.
- Habashi, F. (2005). A short history of hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 79(1-2), 15-22. doi:10.1016/j.hydromet.2004.01.008
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (9 de Octubre de 2022). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme*. Obtenido de  
[https://proyectos.inei.gob.pe/ciiu/frm\\_buscar\\_lista.asp](https://proyectos.inei.gob.pe/ciiu/frm_buscar_lista.asp)
- Jergensen II, G. (2009). Coppe leaching, solvent extraction and electrowining technology. En G. Jergensen II, *Copper leaching, solvent extraction and electrowining technology* (pág. 129). Society for mining, metallurgy and exploration.
- Komulainen, T., Doyle, F., Rantala, A., & Jämsä-Jounela, S.-L. (2009). Control of an industrial copper solvent extraction process. *Journal of Process Control*, 19(1), 3-4. doi:10.1016/j.jprocont.2008.04.019
- Kordosky, G. (2002). Copper recovery using leach/solventextraction/electrowinning technology: Forty years of innovation, 2.2 million tonnes of copper annually. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102(8), 445-450. doi:10.10520/AJA0038223X\_2713
- Littlejohn, P., & Dreisinger, D. (2007). *Hydrometallurgy, Technical Review – Copper Solvent Extraction in Hydrometallurgy*. Report MTRL.
- Marcobre S.A.C. (9 de Octubre de 2022). *Marcobre*. Obtenido de [www.marcobre.com](http://www.marcobre.com)
- Marcobre S.A.C. (2022). *Política de Calidad*. Marcobre S.A.C.

- Martinez, Ó. (01 de Junio de 2021). *Equipo Minero*. Obtenido de Equipo Minero: <https://www.equipo-minero.com/contenidos/vigorosa-recuperacion-minera/>
- Megaw, D., & Burelli, S. (2015). Crud Forx - A New Approach to Crud Management. *Copper Cobalt Africa, incorporating the 8th Southern African Base Metals Conference* (págs. 327-334). Livingstone: Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Pascoletti, A., Tejerina, A., Stevenson, J., & Stern, C. (2013). *Minería en Perú*. Global Business Reports.
- Paynter, J. (1973). A review of copper hydrometallurgy. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 74(4), 158-160. doi:10520/AJA0038223X\_372
- Schlesinger, M., King, M., Sole, K., & Davenport, W. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-096789-9.10015-0
- Sole, K. (2008). Solvent Extraction in the Processing and Purification of Metals: Process Design and Selected. En M. Aguilar, & J. Cortina, *Solvent Extraction and Liquid Membranes* (págs. 145-200). CRC Press.
- Sulla, M. (2013). *ESTUDIO DE LA PLANTA DE ÓXIDOS XSTRATA TINTAYA S.A. PARA OPTIMIZAR LA PLANTA DE EXTRACCION POR SOLVENTES*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN.
- Sunat. (9 de Octubre de 2022). *Consulta RUC*. Obtenido de Consulta RUC: <https://e-consultaruc.sunat.gob.pe/cl-ti-itmrconsruc/FrameCriterioBusquedaWeb.jsp>
- The Institution of Mining and Metallurgy. (1994). Mining Latin America. En T. I. Metallurgy, *Mining Latin America* (pág. 227). Springer Dordrecht.
- Tilton, J., & Landsber, H. (1997). *Innovation, Productivity Growth, and the Survival of the U.S. Copper Industry*. Resources for the future.
- Tilton, J., & Landsberg, H. (1997). *Innovation, Productivity Growth, and the Survival of the U.S. Copper Industry*. Resources for the future. doi:10.22004/ag.econ.10534
- Uceda, D. (2016). *Hidrometalurgia Química e Ingeniería*. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.
- Zenteno, C. (2016). *Electroobtención de cobre empleando método electrodiálítico reactivo*.

## Anexos

pag

Anexo 1: Certificados de trabajo.....	1
Anexo 2: Certificados de capacitaciones .....	2
Anexo 3: Instructivo de medición de bandas para cálculo de inventario de orgánico .....	3
Anexo 4: Registro de capacitación de cursos de seguridad.....	4
Anexo 5: Reconocimiento por desempeño en HSE .....	5
Anexo 6: Evidencias de actividades realizadas .....	6

## **Anexo 1: Certificados de trabajo**



## CERTIFICADO DE TRABAJO

Nuestra empresa Inspectra S.A.

Certifica;

Que, **EDUARDO ARTURO MATEO CHEPE**, identificado con DNI N° 70431347 ha laborado en esta empresa desde el 02 de Enero del 2018 hasta el 11 de Octubre del 2019, ocupando el cargo de **INGENIERO DE PROCESOS**.

Durante el tiempo de su permanencia, ha demostrado puntualidad, honestidad y responsabilidad en las labores encomendadas

Se expide el presente documento para los fines que el interesado estime conveniente.



Paul Aliaga Gastelumendi  
Jefe de Recursos Humanos

Lima, 11 de Octubre del 2019

AV. GUARDIA CIVIL  
686, SAN ISIDRO  
LIMA 27 - PERÚ  
CENTRAL TELEF.:  
(511) 611-8300  
FAX: (511) 224-6263  
WEB SITE : [www.  
inspectraperu.com](http://www.inspectraperu.com)



## CERTIFICADO DE TRABAJO

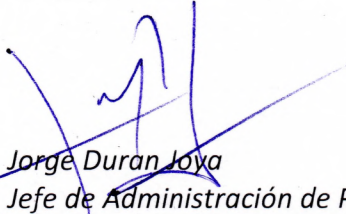
A QUIEN CORRESPONDA:

El (la) señor(a): MATEO CHEPE EDUARDO ARTURO, trabajó en SGS DEL PERU S.A.C., desempeñándose como OPERADOR DE PROCESOS, en el área de LABORATORY-CONSULTORIA METALURGIA desde 16/10/2019 hasta 31/01/2020.

Se expide el presente certificado a solicitud del interesado y para los fines que estime conveniente.

Callao, 31/01/2020

Atentamente



Jorge Duran Joya  
Jefe de Administración de Personal  
SGS del Perú S.A.C.  
RUC: 20100114349



Callao, 19 de Junio del 2022

## **CERTIFICADO DE TRABAJO**

Por la presente certificamos que el(la) Sr(a). **MATEO CHEPE, EDUARDO ARTURO**, identificado(a) con DNI N° **70431347** ha presentado sus servicios profesionales en nuestra Empresa **INSPECTORATE SERVICES PERU S.A.C.** con RUC N° **20385739771** desde el 25 de Junio del 2021 hasta el 19 de Junio del 2022, desempeñando el cargo de **ANALISTA DE LABORATORIO**.

Se expide el presente documento de acuerdo a Ley, para los fines que el interesado crea conveniente.

Atentamente,



**MARIA TRELLES MARTINLK**  
APODERADO

---

**INSPECTORATE SERVICES PERU S.A.C.**

## CONSTANCIA DE TRABAJO

Por medio de la presente MARCOBRE S.A.C. con RUC 20508972734, hace constar que el(la) SR.:

### **EDUARDO ARTURO MATEO CHEPE**

Con número de documento de identidad (DNI) N°**70431347**, presta servicios en nuestra empresa desde el 20 de Junio del 2022 hasta la actualidad, desempeñándose en el cargo de **METALURGISTA DE HIDROMETALURGIA**.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado, para los fines que estime por conveniente.

Lima, 23 de Enero del 2023.

MARCOBRE S.A.C.



---

**ALFREDO CASAS VELARDE**  
GERENTE DE RECURSOS HUMANOS

Marcobre S.A.C

Interior Lima 27, Perú

## **Anexo 2: Certificados de capacitaciones**



**SOUTHERN COPPER**  
SOUTHERN PERU

## **CERTIFICADO DE PRACTICAS PROFESIONALES**

Otorgado a

**Eduardo Arturo Mateo Chepe**

Egresado de la Carrera Profesional Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, quien en virtud a lo establecido en la Ley Sobre Modalidades Formativas Laborales realizó sus Prácticas Profesionales en Southern Peru Copper Corporation-Sucursal del Perú, en la Gerencia LESDE, Superintendencia Técnica, de la Unidad de Producción Toquepala, del 02 de enero del 2017 al 17 de diciembre del 2017.

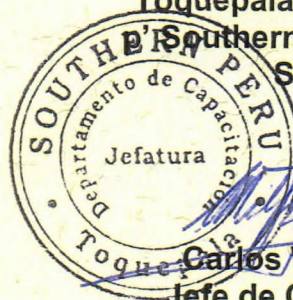
Durante el desarrollo de las Prácticas Profesionales aplicó sus conocimientos, habilidades y aptitudes en el desempeño de las siguientes actividades:

- o Entrenamiento en laboratorio químico realizando ensayos químicos de soluciones del circuito de la Planta por absorción atómica y volumetría (Cu, Fe, Co, Mn, Ácido Libre,  $Fe^{+2}$ , pH, mV, y sólidos suspendidos) los que corresponden al monitoreo diario de la operación y base del sistema de información operativo de la Planta LESDE.
- o Entrenamiento en Control y monitoreo de arrastres A/O y O/A, determinación de carga máxima y selectividad, Inventarios de Electrolito y Orgánico, sólidos suspendidos, caracterización de crudo, eficiencia de coalescedores, eficiencia de Intercambiadores de calor, índice de estriación, preparación de PLS sintético y otras soluciones de soporte para análisis.
- o Entrenamiento en Control y Monitoreo de parámetros en pruebas de viabilidad bacterial, cultivos bacteriales en tanques bioreactores y envíos de carga bacterial a los depósitos lixiviables.
- o Desarrollo de pruebas metalúrgicas y evaluación de proyectos en coordinación con la Superintendencia Técnica: Prueba de Solventes para Extracción por Solventes; Evaluación para identificar la problemática y dar solución a la deficiente adherencia de los cátodos de cobre en las planchas madre; Automatización de los reportes de cierre mensual y certificados de calidad usando las herramientas Power Pivot y Power Query; Evaluación de Planchas Madre modelo ISA Process VS LIMPACT.

Se expide el presente certificado de acuerdo a ley y para los fines que estime conveniente.

Toquepala, 17 de diciembre del 2017

Southern Peru Copper Corporation  
Sucursal del Perú



*Carlos W. Escobedo Ferradas*  
Carlos W. Escobedo Ferradas  
Jefe de Capacitación Toquepala



**CAMARA MINERA  
DEL PERU**

La Cámara Minera del Perú

otorga el

# Diploma

a:

**EDUARDO ARTURO MATEO CHEPE**

por haber aprobado el PROGRAMA de:

## Especialización en Metalurgia

Con una duración de 200 horas, culminado el 08 de septiembre del 2019.

Lima, 12 de septiembre del 2019.




  
**ING. LOURIVAL AUGUSTO TAVAREZ**  
PROGRAM DIRECTOR  
CÁMARA MINERA DEL PERÚ



  
**ING. CÉSAR GALLARDO VELA**  
PRESIDENTE  
CÁMARA MINERA DEL PERÚ



  
**PH.D. TADEUSZ GOŁOSINSKI**  
GENERAL DIRECTOR OF TRAINING PROGRAMS  
MINING SOCIETY OF SOUTH AFRICA

Codigo: R.A-2347-2018

# CERTIFICADO

Otorgado a:

**Eduardo Arturo Mateo Chepe**

Por haber aprobado con una nota de 16 (Dieciséis)

el Programa Integral:

**Procesamiento de Minerales e Hidrometalurgia**

Desarrollado del 21 de abril al 23 de junio de 2018

con una duración de 84 horas.

Lima, 18 de setiembre de 2018.



---

**Jorge Victor Castillo Migone**  
Jefe del Departamento de Minería y Procesos Químico Metalúrgicos

# CERTIFICADO

Otorgado a:

**Eduardo Arturo Mateo Chepe**

Por haber aprobado con una nota de **18 (Dieciocho)**

el Programa Integral:

**Gestión Integral de Proyectos**

Desarrollado del 08 de junio al 07 de septiembre de 2021  
con una duración de 108 horas.

Lima, 18 de septiembre de 2021





**Antonio Lazo De La Vega Velarde**  
Director Académico Nacional

**Andrea Lucyem Lazo Zuñiga**  
Jefa del Departamento de Diseño y Producción Industrial



**Anexo 3: Instructivo de medición de bandas para cálculo de  
inventario de orgánico**

	<b>INSTRUCTIVO</b>			 <b>MINA JUSTA</b> Marcona, Perú
	<b>MEDICIÓN DE BANDAS PARA CÁLCULO DE INVENTARIO DE ORGÁNICO</b>			
	Código: JU-OSX-ITR-001	Versión: 0	Páginas: 1 de 13	
	Área: Óxidos - Extracción por Solventes	Fecha: 18-10-2022		

## INSTRUCTIVO DE MEDICIÓN DE BANDAS PARA CÁLCULO DE INVENTARIO DE ORGÁNICO

**JU-OSX-ITR-001**

Fecha	Descripción	Nombre	Posición	Firma
18/10/2022	Elaborado por	Eduardo Mateo	Metalurgista de Hidrometalurgia	 Eduardo Arturo Mateo Chepe Metalurgista de Hidrometalurgia Metalurgia 
20/10/2022	Revisado por	Einer Urure	Supervisor Senior de Planta SX/EW	 Einer Alexis Urure Tejada Supervisor Senior de Planta de Sx/EW Gerencia de Planta de Óxidos 
22/10/2022	Aprobado por	Javier Rivas	Superintendente de Planta de Óxidos	 Javier Rivas Rodriguez Superintendente de Planta de Óxidos Gerencia de Planta de Óxidos 

## **Anexo 4: Registro de capacitación de cursos de seguridad**

JU-GRH-STG-002.F6 Matriz de Identificación de Necesidades de Capacitación 2022 - V6

Tipo	Horas	DNI	70431347
		Código SAP	801508
		Nombre Completo	EDUARDO ARTURO MATEO CHEPE
		Fecha de ingreso	20/06/2022
		Puesto	METALURGISTA DE HIDROMETALURGIA
		Unidad Organizativa	HIDROMETALURGIA
		Gerencia	METALURGIA
Virtual	8	Inducción Hombre Nuevo	20/06/2022
Virtual	3	Manejo Defensivo y/o transporte de personal	21/07/2022
E-learning	2	El uso de equipo de protección personal	8/07/2022
Virtual	4	Respuesta a emergencias por áreas específicas	22/07/2022
E-learning	2	Significado y uso de código de señales y colores	8/07/2022
Presencial	2	Prevención y protección contra incendios	15/11/2022
Presencial	2	Seguridad con herramientas manuales y eléctricas	24/07/2022
Presencial	2	Bloqueo de energías - presencial	25/06/2022
Presencial	2	Trabajo en espacios confinados - presencial	25/06/2022
Virtual	1	Prevención de lesiones en manos	9/07/2022
Virtual	1	Curso Covid-19	15/08/2022
E-learning	1	Modelo de Prevención	22/06/2022
E-learning	1	Diversidad e Inclusión	22/06/2022
E-learning	1	Política Anticorrupción	8/11/2022
E-learning	1	Código de ética y conducta	1/12/2022
E-learning	0.5	LINGO	22/06/2022
Virtual	1	Sensibilización e interpretación ISO 9001:2015	13/11/2022

## **Anexo 5: Reconocimiento por desempeño en HSE**



**BUREAU  
VERITAS**

**Inspectorate Services Perú S.A.C.**

Otorga al Sr.:

**Eduardo Arturo Mateo Chepe**

El reconocimiento como:

**El trabajador con mejor desempeño en HSE**

Durante el mes de Enero del 2022

En la Categoría Outsourcing - Servicio Marcobre M&M

**Marcona - Perú**

**01 de Febrero del 2022**



**ING. STEFANO RAFFO  
JOHNSON**  
GERENTE DE DIVISIÓN M&M  
División Metales y Minerales



**ING. LOURDES OSEDA**  
COORDINADOR GENERAL HSE  
División Metales y Minerales

REC-TSMM-002-2022

## **Anexo 6: Evidencias de actividades realizadas**

## Eduardo Arturo Mateo Chepe

---

**De:** Eduardo Mateo Chepe  
**Enviado el:** jueves, 22 de diciembre de 2022 16:04  
**Para:** Mirko Eduardo Castillo Robles; Hector Leonel Malaga Lazo  
**CC:** Ernesto Flores Cutipa; Ronald Quispe Castro; Julio Alejandro Castro Andrade

**Asunto:** RE: Reporte de Cinéticas de Lixiviación en bateas 15 a 7  
**Datos adjuntos:** Cineticas de Lixiviación en bateas 15 a 7 (16 a 25-Nov-22).pptx; Planilla cinetica bateas LOM 2023\_Reporte REV01.xlsx; 3. OL-002-22 Columnas batea, Muestra Bateas 5 y 7 (C1 - C2 - C3 - C4) rev 4.xlsx; 2. OL-002-22 Columnas batea, Muestra Bateas 3 y 4 (C7 - C8 - C10 - C11 ) rev 4.xlsx

Hola Mirko,

Se actualiza los datos de %C, no se ha analizado en todos los rипios de las columnas. En las próximas pruebas se considerará este análisis en cabeza y rипios.

Las recuperaciones de las bateas 10 y 11 de planta los podemos calcular para tu referencia.

Tenemos identificado algunas oportunidades de mejora para lo cual estamos generando instructivos operativos para la correcta ejecución de las pruebas de lixiviación en columna batea.

Saludos,



▶ Eduardo Mateo Chepe  
▶ Metalurgista de Hidrometalurgia  
▶ Telf. +51

---

**De:** Mirko Eduardo Castillo Robles <mirko.castillo@marcobre.com>

**Enviado el:** jueves, 22 de diciembre de 2022 15:03

**Para:** Eduardo Mateo Chepe; Hector Leonel Malaga Lazo

**CC:** Ernesto Flores Cutipa ; Ronald Quispe Castro ; Julio Alejandro Castro Andrade ; Alcides Churacutipa Huanca

**Asunto:** RE: Reporte de Cinéticas de Lixiviación en bateas 15 a 7

Eduardo;

También me gustaría ver el % de pérdida de finos en los rипios, dato medido en la descarga de las columnas.

De acuerdo al %C alimentado a la columna según la alimentación de los OXI's , debería variar el peso de los rипios o el % de pérdida de finos; pienso yo.

Mirko



## CONTROL CARGA MAXIMA Y % DE EXTRACTANTE - Octubre / Noviembre 2022

### CONTROL DE CARGA MAXIMA

Equipo de Hidrometalurgia

QR-MET- 301 -2022

#### 1. OBJETIVO

- Determinar la carga máxima del Orgánico (Acorga M5774) existente en planta de acuerdo a las especificaciones requeridas por el proceso de SX.
- Determinar el % de extractante luego de la adición de todos los LIBCs de Extractante considerados para el inventario de orgánico en Planta.

#### 2. PROCEDIMIENTO

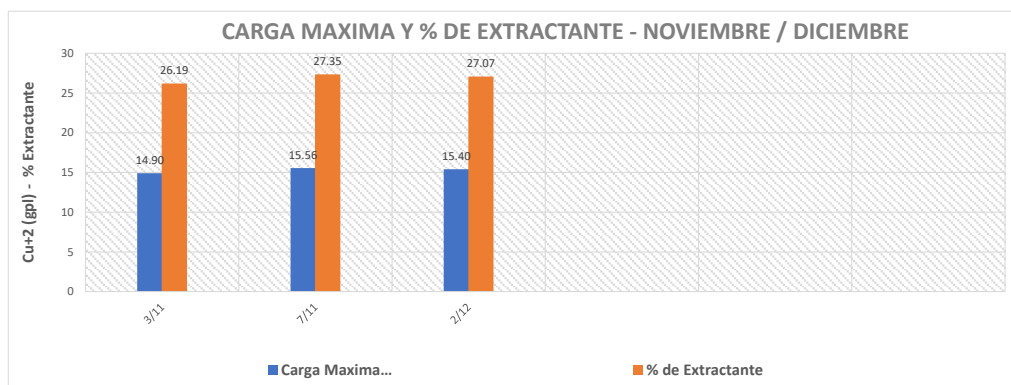
- Recepcionar la muestra del tanque TK OC de planta SX.
- Preparar 60 ml de muestra de orgánico.
- A razón de 1:1 Contactar vigorosamente el orgánico (60ml) con una solución de Cu (10g/L) por un tiempo de 3 minutos, repetir la operación 4 veces.
- Desechar la solución acuosa remanente (solución de Cu).
- Filtrar con papel de separador de fases (Evitar microgotas de solución de Cu)
- Con el orgánico cargado y filtrado contactar con una solución acida (190 g/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a razón de 1:1 por 3 min y repetir 3 veces (desc. máxima).
- Colectar el acuoso en una fiola de 250 mL.
- Realizar la prueba por duplicado.
- Enviar a laboratorio químico y obtener la concentración de CuT. Finalmente proceder al reporte.

#### 3. DATOS Y RESULTADOS

Los resultados de la prueba se muestra a continuación:

Factor de carga de Cobre: 0.569 g/l

2/12/2022		
FECHA	Carga Maxima (Cu g/L)	Extractante (%)
3-Nov-22	14.9	26.19
3-Nov-22	15.56	27.35
2-Dic-22	15.4	27.07
<b>Promedio</b>	<b>15.29</b>	<b>26.87</b>



#### 4. CONCLUSIONES :

Se determinó la carga máxima promedio en lo que va del mes de 15.29 g/L de Cu.