

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesores Patrocinantes

Fernando Parada

**EVALUACIÓN DE UN CIRCUITO DE SX PARA SOLUCIONES
CONCENTRADAS DE COBRE UTILIZANDO EXTRACTANTE ACORGA
M5640**

TOMAS RIOSECO MALDONADO

Informe de Memoria de Titulo
para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Agosto, 2025

Resumen

Debido a distintos motivos, es interesante explorar la vía hidrometalúrgica al tratamiento de concentrados de minerales sulfurados de cobre. Distintas tecnologías se usan para lixiviar estos minerales y este trabajo se centra en como las soluciones obtenidas por dichos procesos pueden ser purificadas para, posteriormente, obtener cobre por electro-obtención.

La tecnología usualmente aplicada para purificación de soluciones de estas características es la de extracción por solvente, o SX por su nombre en inglés. Esta consta en separar elementos de interés a base de la solubilidad de dichos elementos en dos fases inmiscibles, una fase acuosa que contiene el elemento de interés, en este caso cobre y una fase orgánica, encargada de extraer el cobre. Para este trabajo se decidió, en base a conocimientos previos, utilizar el extractante Acorga m5640 concentrado al 35% v/v en Escaid 110.

El trabajo experimental se enfocó en evaluar el efecto de la acidez y temperatura de estas soluciones en la etapa de SX. Para eso se prepararon soluciones de PLS sintético, preparados en laboratorio, con 35 g/L de cobre y distintas concentraciones de H_2SO_4 , 5-10 y 20 g/L. Estas soluciones se utilizaron para obtener isotermas de extracción y re-extracción de cobre.

Con estas isotermas se simulaban balances de masa bajo distintas configuraciones operacionales para obtener una caracterización de cómo se desempeñaría el extractante Acorga m5640. Además, permite tener información de las características de los refinados obtenidos.

Los resultados mostraron, en general, una buena extracción de cobre para todas las concentraciones de ácido, desde 70% a 87% de cobre extraído. El aumento de la acidez del PLS disminuye el porcentaje de extracción y la eficiencia de la fase orgánica.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
2. Antecedentes	3
2.1. Extracción hidrometalúrgica de cobre	3
2.2. Generalidades Extracción por Solvente del cobre	4
2.3. Química de la extracción por solvente de cobre	5
2.4. Composición de la fase orgánica	6
2.4.1. El extractante.....	6
2.4.2. El diluyente	7
2.5. Diseño cuantitativo de un circuito de SX	7
2.5.1 Determinación de Isotermas.....	7
2.5.2 Extracción en contracorriente.....	8
2.6. Tratamiento hidrometalúrgico de sulfuros.....	10
2.7. Consideraciones para SX de soluciones obtenidas por lixiviación de concentrados de cobre.	11
3. Desarrollo experimental.	13
3.1 Soluciones utilizadas.	13
3.2. Procedimiento	13
3.2.1 Pruebas isotermas de extracción	13
3.2.2 Pruebas isoterma re-extracción.	14
4. Resultados	16
4.1 Efecto de la concentración de ácido en el PLS.....	16
4.2 Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción	17
4.3. Isotermas de re-extracción	19
4.4 Desempeño en distintas configuraciones de planta.	20
4.5. Caracterización de refino.	23
5. Discusiones.....	24
6. Conclusiones.	25
7. Glosario	26

8. Referencias.....	27
9. Anexos.....	28
9.1 Pruebas isothermas extracción.....	28
9.2: Isothermas re-extracción.....	31
9.3 Diagramas McCabe-Thiele.	32
9.4 Detalles balance de cobre.....	35

Índice Tablas

Tabla 2.1: Análisis de soluciones obtenidas por lixiviación de concentrados de cobre. (Zambra et al., 2013).....	12
Tabla 3.1: Plan de pruebas para isothermas de extracción.....	14
Tabla 3.2. Pruebas para isothermas de re-extracción.....	15
Tabla 4.1. Parámetros operacionales para los distintos circuitos comparados.....	21
Tabla 4.2. Resultados para distintas configuraciones de circuito y concentración de ácido en el PLS.....	22
Tabla 4.3. Caracterización refinados obtenidos en distintas configuraciones.....	23
Tabla 9.1: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 5 g/L 35°C.....	28
Tabla 9.2: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 5 g/L 20°C.....	28
Tabla 9.3: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 10 g/L 35°C.....	29
Tabla 9.4: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 10 g/L 20°C.....	29
Tabla 9.5: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 20 g/L 35°C.....	30
Tabla 9.6: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 20 g/L 20°C.....	30
Tabla 9.7: Datos para isoterma de re-extracción con orgánico cargado de un PLS con 5 g/L Ácido sulfúrico.....	31
Tabla 9.8: Datos para isoterma de re-extracción con orgánico cargado a partir de un PLS con 10 g/L Ácido sulfúrico.....	31
Tabla 9.9: Datos para isoterma de re-extracción con orgánico cargado a partir de un PLS con 20 g/L Ácido sulfúrico.....	32
Tabla 9.10: Detalles balance Cu para PLS 5 g/L H ₂ SO ₄ configuración 2E2S.....	35
Tabla 9.11: Detalles balance Cu para PLS 10 g/L H ₂ SO ₄ configuración 2E2S.....	36
Tabla 9.12: Detalles balance Cu para PLS 20 g/L H ₂ SO ₄ configuración 2E2S.....	37
Tabla 9.13: Detalles balance Cu para PLS 5 g/L H ₂ SO ₄ configuración 2E1S.....	37
Tabla 9.14: Detalles balance Cu para PLS 10 g/L H ₂ SO ₄ configuración 2E1S.....	38
Tabla 9.15: Detalles balance Cu para PLS 20 g/L H ₂ SO ₄ configuración 2E1S.....	38

Tabla 9.16: Detalles balance Cu para PLS 5 g/L H₂SO₄ configuración 3E2S.....39

Tabla 9.17: Detalles balance Cu para PLS 10 g/L H₂SO₄ configuración 3E2S.....40

Tabla 9.18: Detalles balance Cu para PLS 20 g/L H₂SO₄ configuración 3E2S.....41

Índice Figuras

Figura 2.1: Esquema simplificado de la extracción hidrometalúrgica de cobre.....	3
Figura 2.2: Esquema simplificado de un mezclador-decantador.....	5
Figura 2.3: Esquema de una operación el flujo contracorriente. (Ruiz, 2016).....	8
Figura 2.4: Diagrama McCabe-Thiele para la extracción de un metal. (Ruiz, 2016).....	9
Figura 2.5: Efecto de la razón de fases en la extracción de un metal. (Ruiz, 1016).....	9
Figura 2.6: Diagrama de McCabe-Thiele para la re-extracción de un metal.....	10
Figura 3.1. Esquema resumido del montaje de una prueba de extracción.....	14
Figura 4.1. Isoterma de extracción de cobre desde un PLS 40 g/L Cu. Extractante Acorga M5640 35% v/v en Escaid 110.....	16
Figura 4.2. Curvas ajustadas para isotermas de extracción de PLS 40 g/L Cu. Extractante Acorga m5640 35% v/v en Escaid 110.....	17
Figura 4.3: Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción para el PLS con 40 g/L de Cu y 5 g/L de H ₂ SO ₄	18
Figura 4.4: Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción para el PLS con 40 g/L de Cu y 10 g/L de H ₂ SO ₄	18
Figura 4.5: Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción para el PLS con 40 g/L de Cu y 10 g/L de H ₂ SO ₄	19
Figura 4.6. Isotermas re-extracción Acorga m5640 35% v/v con solución 35 g/L Cu y 180g/L H ₂ SO ₄ , a partir de orgánico cargado con PLS de distintas concentraciones de ácido.....	20
Figura 4.7: Esquema de un circuito de SX 2 etapas de extracción y 2 de re-extracción en contra corriente. Línea negra flujos acuoso y línea azul flujo de orgánico.....	21
Figura 4.8: Esquema de un circuito de SX 2 etapas de extracción y 1 de re-extracción en contra corriente. Línea negra flujos acuoso y línea azul flujo de orgánico.....	21
Figura 4.9: Esquema de un circuito de SX 3 etapas de extracción y 2 de re-extracción en contra corriente. Línea negra flujos acuoso y línea azul flujo de orgánico.....	22
Figura 9.1. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 3E2S para un PLS con [H ⁺]=5g/L.....	32
Figura 9.2. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E2S para un PLS con [H ⁺]=5g/L.....	32

Figura 9.3. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E1S para un PLS con $[H^+]=5\text{g/L}$	33
Figura 9.4. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 3E2S para un PLS con $[H^+]=10\text{g/L}$	33
Figura 9.5. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E2S para un PLS con $[H^+]=10\text{g/L}$	33
Figura 9.6. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E1S para un PLS con $[H^+]=10\text{g/L}$	34
Figura 9.7. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 3E2S para un PLS con $[H^+]=20\text{g/L}$	34
Figura 9.8. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E2S para un PLS con $[H^+]=20\text{g/L}$	34
Figura 9.9. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E1S para un PLS con $[H^+]=20\text{g/L}$	35

1.Introduccion

El cobre es uno de los principales metales no ferrosos utilizados en el mundo, y se espera que tenga un rol clave dentro de los próximos años. Alrededor de un 20% del Cobre mundial es producido por vías hidrometalúrgicas. Estos procesos tratan, en su mayoría, minerales oxidados, en donde el cobre es recuperado por una etapa de lixiviación, seguida de extracción por solvente y finalmente una electro-obtención. (Schlesinger et al., 2003)

El propósito de la etapa de extracción por solvente es purificar las soluciones provenientes de la lixiviación y dejarla con las condiciones óptimas para la etapa de electro-obtención. Dicho esto, dado la naturaleza de los minerales tratados, las soluciones de lixiviación que se envían extracción por solvente típicamente contienen 1-10 g/L Cu y 0.5-5g/L H_2SO_4 , más una serie de impurezas como Fe. (Schlesinger et al., 2003)

En los últimos años, en Chile, los minerales explotados por la industria han cambiado y los minerales oxidados son cada vez más escasos, la producción de cátodos SXEW pasara de representar el 19,6% de la producción total el 2024(equivalente a 1,06 millones de toneladas) a un 12,3% en 2034, cerca de 681 mil toneladas (Cochilco, 2024). Esta situación traerá consigo una subutilización de instalaciones hidrometalúrgicas. Este contexto origina una oportunidad para buscar una alternativa hidrometalúrgica para el tratamiento de concentrados de cobre. Una estas alternativas es la lixiviación a presión en medio sulfato de concentrados de cobre. Procesos de esta naturaleza generan soluciones con características no tradicionales, como temperaturas más elevadas, concentraciones altas de cobre y ácido sulfúrico, mayor variabilidad en sus concentraciones, distintas impurezas y un mayor porcentaje de solidos en suspensión. Entre estos procesos se encuentran los denominados como TPOX, CESL y BIOCOPTM, entre otros. (Dreisinger, 2006)

Dado esto, resulta importante poder caracterizar el desempeño de los reactivos típicos usados en la actualidad en estas nuevas condiciones. En este trabajo se desarrolló un estudio experimental para caracterizar el desempeño del reactivo Acorga M5640 en altas concentraciones de cobre y ácido sulfúrico. El extractante Acorga M5640 es una aldoxima modificada que ha reportado un buen desempeño en soluciones concentradas de cobre, por lo que fue elegido para el presente estudio caracterizando su desempeño en soluciones con concentración de H_2SO_4 variables. Después, se evalúa

el desempeño de este en distintas configuraciones operacionales y así tener valores iniciales de recuperación y extracción de cobre.

1.1 Objetivos

Caracterizar y evaluar el desempeño del reactante Acorga M5640 en soluciones concentradas de cobre con alta acidez. Esto mediante pruebas de laboratorio con soluciones sintéticas estandarizadas.

1.2 Objetivos específicos

Para esto, el trabajo fue organizado en una parte experimental seguida de una parte analítica. En la parte experimental se determinará:

- Isotermas de extracción para distintas concentraciones de ácido en el PLS.
- Isotermas de extracción a distintas temperaturas.
- Construir diagramas McCabe-Thiele para distintas condiciones operacionales.
- Calcular composición ácida de solución de refinado para estas distintas condiciones operacionales.

2. Antecedentes

2.1. Extracción hidrometalúrgica de cobre

En Chile se están dando señales de un inminente cambio en la matriz productiva de cobre. Con una escasez de nuevos proyectos hidrometalúrgicos, sumado a una gran cantidad de iniciativas que buscan expandir o extender la vida operacional de faenas minerales sulfurados tenemos un escenario donde la participación hidrometalúrgica del país pasaría de un 19,6% de la producción el 2024 a un 12,3% el 2034 (Cochilco, 2024). Esta variación implica una generación de capacidad ociosa de las instalaciones que tratan minerales por la vía hidrometalúrgica. Para poder sobrellevar estos problemas, una de las alternativas planteadas es un tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre.

Las operaciones hidrometalúrgicas actuales cuentan con tres grandes etapas para la recuperación de cobre: lixiviación, extracción por solvente y electro obtención.

En la lixiviación el cobre se disuelve desde el mineral hacia una solución acuosa para producir una solución denominada PLS (del inglés Pregnant Leach Solution). Esta solución contiene además de cobre otras impurezas como Fe,Al,Co,Mn,Mg, etc., dependiendo de las características de los minerales tratados. Este PLS es luego alimentado a la etapa de extracción por solvente o SX (del inglés solvent extraction), para purificarla y llevarla a condiciones óptimas para la electro-obtención. Por último, en la etapa de electro obtención, el cobre en la solución, llamada electrolito, se reduce para obtener cobre metálico en el cátodo por la aplicación de corriente eléctrica.

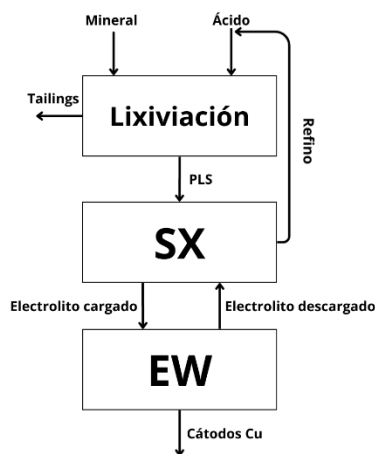


Figura 2.1: Esquema simplificado de la extracción hidrometalúrgica de cobre.

2.2. Generalidades Extracción por Solvente del cobre

La etapa de extracción por solvente, en la metalurgia del cobre, es una etapa encargada de purificar y mejorar la solución de lixiviación para que esta tenga las condiciones requeridas para la electro-obtención de cobre.

Las soluciones de lixiviación son, en su mayoría, soluciones diluidas de cobre (1-10 g/L) y con contenido elevado de impurezas. Esto hace que no sean aptas para su electro-obtención, por lo que se requiere esta etapa intermedia para ajustar sus características.

La electro-obtención necesita electrolitos puros y ricos en cobre (45-55 g/L) con alta conductividad para así asegurar la producción de un cátodo de cobre de características comerciales.

La extracción por solvente cuenta con dos etapas continuas esenciales: La Extracción y la Re-extracción. En la etapa de extracción el PLS se pone en contacto con una fase orgánica que contiene al extractante, los cuales son inmiscibles. Este extractante por distintos mecanismos dependiendo de su naturaleza extrae el cobre desde la fase acuosa (PLS) hacia la fase orgánica. Luego, la fase orgánica cargada con cobre (orgánico cargado), y la fase acuosa que contiene las impurezas (refino), son separadas por la gravedad.

Luego de esto, en el circuito de re-extracción, la fase orgánica cargada de cobre es contactada con una fase acuosa con alta acidez que favorece la reacción en el sentido opuesto, es decir, el cobre sale de la fase orgánica hacia la fase acuosa. Esto hace que se obtenga una solución acuosa con las características deseadas para una correcta electro obtención.

Hay distintos equipos, pero los más utilizados son los mezcladores-decantadores. Estos tienen dos zonas. Una de mezcla, donde por agitación mecánica se mezclan ambas fases y es donde ocurre la reacción de extracción, o re-extracción dependiendo de la etapa, y por otro lado una zona de separación de fases donde debido a la inmiscibilidad y la diferencia de densidad ambas fases se separan. En la figura 2.2 se muestra un esquema de estos equipos.

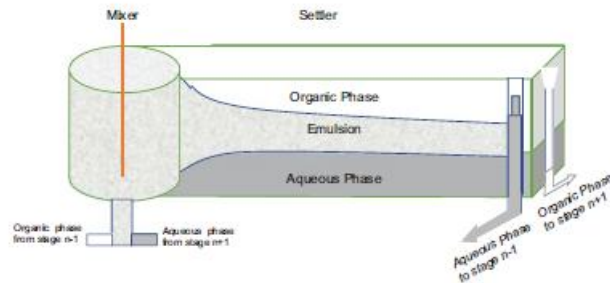


Figura 2.2: Esquema simplificado de un mezclador-decantador.

2.3. Química de la extracción por solvente de cobre

En la etapa de extracción, el agente extractante de la fase orgánica remueve el Cu de la fase acuosa mediante la siguiente reacción de intercambio iónico:



RH corresponde al agente activo del extractante. De acuerdo con la ecuación de extracción, la reacción directa se favorece en condiciones de baja concentración de iones H^+ en la fase acuosa. Por cada ion Cu^{2+} extraído hacia la fase orgánica, se liberan dos protones ($2H^+$), lo que provoca un aumento de la acidez en la fase acuosa.

Una vez alcanzado el equilibrio, las fases orgánica y acuosa se separan por gravedad. La fase orgánica cargada con cobre se conduce al circuito de re-extracción (stripping), donde el cobre es transferido nuevamente a una fase acuosa mediante el uso de una solución con alta concentración de ácido, condición que permite revertir la reacción descrita en la ecuación (1).



Esta reacción es promovida en la etapa de re-extracción debido a las altas concentraciones de H^+ en la fase acuosa de esta etapa. Así, de acuerdo con la reacción (2), el cobre fluye hacia la fase acuosa nuevamente, dejando el orgánico regenerado para ser recirculado hacia la etapa de extracción. Por otro lado, la fase acuosa está purificada y enriquecida con las concentraciones de cobre óptimas para la electro-obtención. Ambos procesos (extracción y re-extracción) son procesos controlados por su equilibrio químico.

2.4. Composición de la fase orgánica

La fase orgánica es la encargada de separar de forma selectiva un componente de la fase acuosa. Este tiene que ser inmiscible en soluciones con $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ y suficientemente fluido para poder ser transportado y mezclado. Esta fase tiene principalmente dos componentes:

2.4.1. El extractante

Es la molécula activa encargada de realizar la extracción de la especie de interés. Los extractantes se pueden clasificar según el mecanismo que ocupan para extraer la molécula de interés. Los extractantes modernos de cobre se componen del compuesto orgánico oxima, principalmente cetoximas y aldoximas. Estas moléculas forman un complejo con los iones Cu^{2+} en un proceso denominado quelación. Es la naturaleza de esta reacción quelante que permite que los reactivos sean selectivos para el cobre.

Hay cuatro clases de extractante de cobre: ketoximas, aldoximas modificadas, mezclas de aldoximas-ketoximas y mezclas de aldoximas-ketoximas modificadas. La selección de cada uno de estos dependerá de las propiedades del PLS, las características requeridas para el electrolito de avanzada, la cantidad de etapas de extracción y re-extracción y razones económicas.

Las ketoximas son relativamente débiles, poseen una baja selectividad, pero tienen la mejor estabilidad química. Por esto son preferidas para aplicaciones muy específicas como el tratamiento de soluciones que contienen agentes oxidantes fuertes, como los nitratos, que podrían degradar rápidamente al extractante. (Schlesinger et al., 2003)

Por otro lado, las aldoximas son extractantes fuertes, sin embargo, solo pueden ser re-extraídas a altas concentraciones de ácido, por sobre los 225g/L de ácido sulfúrico. Estas concentraciones de ácido son muy altas y por esta razón normalmente estas son usadas en una mezcla con ketoximas y/o modificadores. Las aldoximas modificadas no requieren niveles tan grandes de ácidos para ser re-extraídas y pueden ser formulados para tener la fuerza deseada. También tienen mejor selectividad de Cu sobre Fe que las mezclas de aldoximas-ketoximas y son por eso favorecidas para tratar soluciones con alto contenido de Fe. Las mezclas de aldoximas-ketoximas se re-extraen a menor concentración de ácido y son apropiadas cuando la concentración de cobre en el PLS es más baja y no hay una concentración importante de Fe. Mezclas de aldoximas y ketoximas modificadas tienen propiedades intermedias entre aldoximas modificadas y mezclas aldoxima-ketoximas. (Schlesinger et al., 2003)

Los extractantes deben cumplir una serie de requerimientos como:

- Extraer eficientemente cobre del PLS para un determinado pH
- Re-extraer el cobre hacia el electrolito de EW bajo las concentraciones ácidas típicas de los electrolitos de EW
- Tener cinética de extracción y re-extracción rápidas
- Permitir una rápida y completa separación de la fase orgánica con la acuosa, tanto en los circuitos de extracción como de re-extracción, es decir, no formar una emulsión estable
- Ser insoluble en la fase acuosa
- Ser estable bajo las condiciones de extracción y re-extracción para así poder ser recirculado en el circuito
- No absorber ácido sulfúrico
- Extraer Cu preferentemente sobre otras especies presentes en el PLS (sobre todo aquellas que son perjudiciales para el proceso de EW)

2.4.2. El diluyente

Las oximas son líquidos de alta viscosidad, por lo tanto, no aptos para el transporte, mezclado y separación. Por esto, es necesario que la fase orgánica se diluya para darle las propiedades físicas aptas para su utilización. Normalmente el extractante solo requiere una concentración de 5-35% vol. Esta concentración de extractante depende de la concentración de cobre en el PLS. El diluyente además debe tener ciertas propiedades como estabilidad química, baja toxicidad, baja viscosidad y alto punto de ignición.

2.5. Diseño cuantitativo de un circuito de SX

2.5.1 Determinación de Isotermas

Se realizan pruebas de laboratorio con el objetivo de determinar las características del equilibrio de extracción y re-extracción entre la fase orgánica y la fase acuosa (PLS en el caso de la extracción, y electrolito para la re-extracción). La isoterma de extracción se establece mediante una serie de

contactos entre el PLS y la fase orgánica descargada, utilizando distintas razones orgánico/acuoso (razón O/A). Estos contactos tipo batch se mantienen hasta alcanzar el equilibrio del sistema. Posteriormente, se analiza la concentración de cobre en cada fase. La concentración de cobre en la fase acuosa se grafica en función de su concentración en la fase orgánica.

La isoterma de re-extracción se determina de manera análoga, utilizando la fase orgánica cargada y el electrolito gastado. Es importante destacar que el equilibrio representado por las isotermas es específico para las condiciones bajo las cuales fueron obtenidas. Por lo tanto, cualquier variación en las variables del sistema podría modificar los resultados del equilibrio.

2.5.2 Extracción en contracorriente

Teóricamente, para poder extraer la totalidad de una especie metálica desde una fase acuosa sería necesario una cantidad infinita de extractante. Es por lo que es necesario que la extracción se lleve a cabo en varias etapas al tener cantidades limitadas de orgánico. En la industria se emplea una extracción continua en varias etapas a contracorriente. En este proceso, la fase orgánica y la fase acuosa pasan entre etapas en dirección opuesta, así, la fase acuosa con baja concentración de la especie metálica es contactada con orgánico fresco, en cambio el orgánico más saturado se contacta con soluciones acuosas frescas. En la Figura 2.3 se muestra un esquema de un sistema de n-etapas en flujo contracorriente.

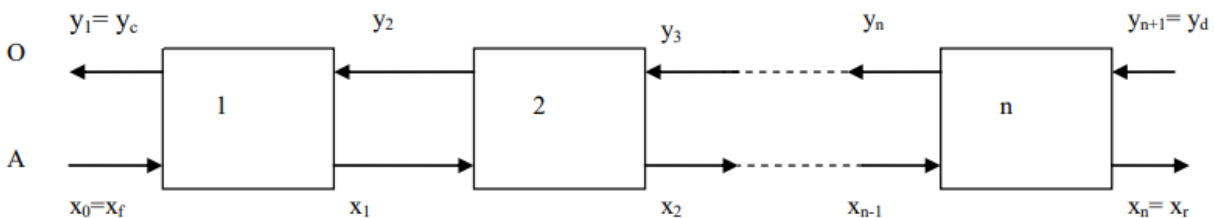


Figura 2.3: Esquema de una operación el flujo contracorriente. (Ruiz, 2016)

Usando las isotermas de extracción obtenidas, y suponiendo una razón O/A, se puede construir un diagrama McCabe-Thiele para determinar el número de etapas necesarias para obtener un refino con una concentración determinada de cobre en un circuito en contra corriente. Un ejemplo de esto se puede ver en la Figura 2.4. En esta se observa como a una solución (PLS) con concentración X_f de un metal que se extrae en 3 etapas en flujo contracorriente. Dicha solución termina con una concentración del metal igual a X_r (refino). La línea de operación representa el balance de masa de dicho elemento a

lo largo de las distintas etapas. La pendiente de esta línea es la razón A/O del sistema. Si varía la pendiente de la recta se observa cómo será el efecto de un cambio en la razón de los flujos acuosos y orgánicos. En la Figura 2.5 se observa que si se aumenta la razón A/O la extracción del metal será menor para el mismo número de etapas. Como efecto contrario, si disminuye la razón A/O aumentará la extracción del metal desde la solución de alimentación. Este comportamiento ocurre debido a que un aumento de fase acuosa permite un mayor nivel de carga del orgánica, pero que este a su vez está en equilibrio con una fase acuosa con mayor concentración del metal de interés. De manera similar, para la etapa de re-extracción se puede seguir el mismo procedimiento para construir un diagrama de McCabe-Thiele. Un ejemplo de este se presenta en la Figura 2.6.

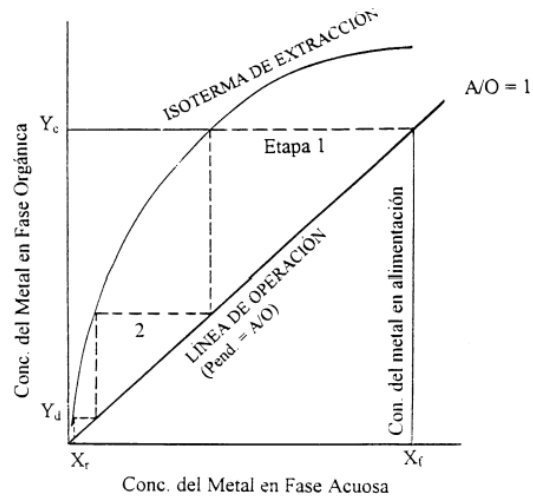


Figura 2.4: Diagrama McCabe-Thiele para la extracción de un metal. (Ruiz, 2016)

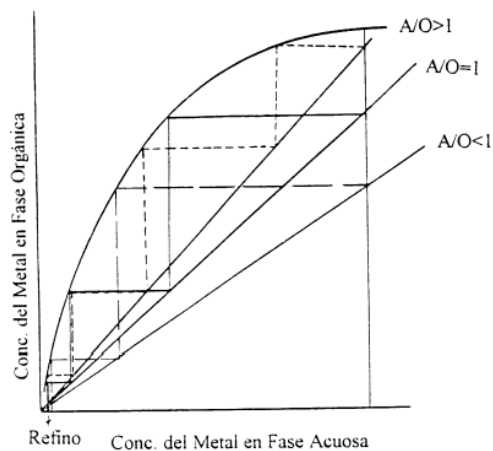


Figura 2.5: Efecto de la razón de fases en la extracción de un metal. (Ruiz, 1016)

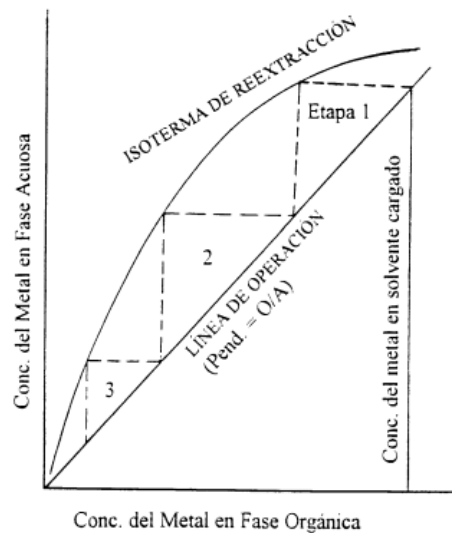


Figura 2.6: Diagrama de McCabe-Thiele para la re-extracción de un metal.

2.6. Tratamiento hidrometalúrgico de sulfuros

El tratamiento de concentrados de cobre por vía hidrometalúrgica tiene ciertas ventajas por sobre el tratamiento pirometalúrgico. Estas serían, ausencia de emisiones tóxicas, se podría aprovechar las instalaciones existentes, y es más simple el manejo de impurezas como el arsénico u otros metales de valor contenidos en el concentrado. Por otro lado, la vía hidrometalúrgica tiene que superar una serie de dificultades, principalmente que es una reacción con cinética muy lenta debido en parte a la formación de una capa pasivante en la superficie del mineral. Para ello hay distintas alternativas tecnológicas de lixiviación, dentro de las cuales se encuentra la lixiviación en medios sulfato y cloruro. Este trabajo se enfocará en las tecnologías de lixiviación en medio sulfato.

Una alternativa es la planteada por Ecometales de Codelco. Esta plantea la aplicación de la tecnología TPOX para procesar concentrados de cobre con altos contenidos de arsénico. Las condiciones de este proceso de lixiviación en autoclave permiten una eficiente extracción de cobre y la estabilización de arsénico como scorodita en el mismo reactor, lo que resulta muchos más simple que el manejo de arsénico en un proceso convencional.

2.7. Consideraciones para SX de soluciones obtenidas por lixiviación de concentrados de cobre.

Anteriormente, se vio que esta tecnología se utiliza para tratar soluciones de baja concentración de cobre y ácido. Ahora, la lixiviación de concentrados produciría soluciones muy distintas, con cambios en su composición tanto física como química. Dentro de las posibles variaciones que estas tienen esta:

- Alta concentración de cobre
- Alta concentración de ácido sulfúrico
- Temperaturas elevadas del PLS
- Mayor variabilidad en la composición del PLS
- Cambios en las impurezas del PLS
- Mayor porcentaje de sólidos en suspensión, sílice u otros contaminantes

Estos cambios en el PLS podrían requerir modificaciones en los circuitos de SX, tanto desde el punto de vista operacional como de diseño. Por ejemplo:

- Revisión de la configuración de plantas
- Selección del agente extractante y la concentración de este
- Condiciones operacionales (razón de flujos O/A)
- Impacto de las altas temperaturas
- Perfil de impurezas
- Sólidos en suspensión y floclantes, formación de crud
- Procesos paralelos (Lavado PLS, separación solido-liquido, neutralización PLS) (Zambra et al., 2013).

Los PLS generados por el tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre pueden ser muy variados dependiendo del concentrado y la tecnología usada. En la Tabla 2.1 se presentan rangos de concentración de los elementos mas comunes.

Tabla 2.1: Análisis de soluciones obtenidas por lixiviación de concentrados de cobre. (Zambra et al., 2013)

Element	Concentration (range)	Unit
Cu	20 - 60	gpl
H ₂ SO ₄	20 - 100	gpl
Fe	2 - 40	gpl
Mo	0 - 200	ppm
Al	0 - 1000	ppm
Mn	0 - 50	ppm
Mg	20 - 1000	ppm
As	100 - 3000	ppm
Bi	0 - 20	ppm
Sb	0 - 20	ppm

Entonces, como se mencionó previamente, dependiendo del tipo de concentrado y la tecnología usada, el nivel de concentración de impurezas puede variar. Sin embargo, independiente de estos factores el nivel de concentración de Cu y H₂SO₄ tienden a ser altos, lo que representan desafíos para alcanzar niveles aceptables de recuperación en la etapa de SX.

3. Desarrollo experimental.

3.1 Soluciones utilizadas.

Las soluciones acuosas utilizadas para obtener la isoterma de extracción corresponden a un PLS sintético, que se obtuvieron disolviendo sulfato cúprico pentahidratado de grado analítico ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y adicionando ácido sulfúrico de 98% analítico. Las concentraciones utilizadas fueron las siguientes:

- Cu^{2+} : 40 g/L

- H_2SO_4 : 5, 10, 20 g/L

Estas soluciones también fueron utilizadas para cargar el orgánico para la fase de re-extracción. Para la etapa de re-extracción se utilizó una solución de 35 g/L Cu^{2+} y 180 g/L de H_2SO_4 , preparadas de la misma manera.

Dada la alta concentración de cobre, al definir la composición de la fase orgánica se consideró el nivel más alto de extractante recomendado de tal forma de mantener sus propiedades físicas y de esta forma no afectar la separación de fases. La composición de la fase orgánica usada contenía Acorga M5640 al 35% v/v diluido en Escaid 110.

3.2. Procedimiento

3.2.1 Pruebas isotermas de extracción

Para la determinación de las curvas de equilibrio de extracción se mezclaron en embudos de decantación distintos volúmenes del PLS sintético con la fase orgánica. Estos volúmenes están detallados en la Tabla 3.1. Una vez contactado los volúmenes se agitó vigorosamente por 5 minutos, luego se dejó reposar por 20 minutos para una completa separación de fases. Cuando las fases ya se separaron se extrajo una muestra de la fase acuosa para analizar por contenido de Cu^{+2} . Para determinar el contenido de cobre en la fase orgánica se separó una muestra de orgánico y se contactó con una solución acuosa con 200 g/L de H_2SO_4 en razón O/A de 1:2. Este contacto se repitió tres veces para la misma muestra de orgánico para así asegurar que todo el cobre haya sido extraído. Los acuosos de estos tres contactos son analizados para su contenido de Cu^{+2} del cual se puede luego calcular la

concentración de cobre en el orgánico. Un esquema resumido del montaje de una prueba de extracción se encuentra en la Figura 3.1

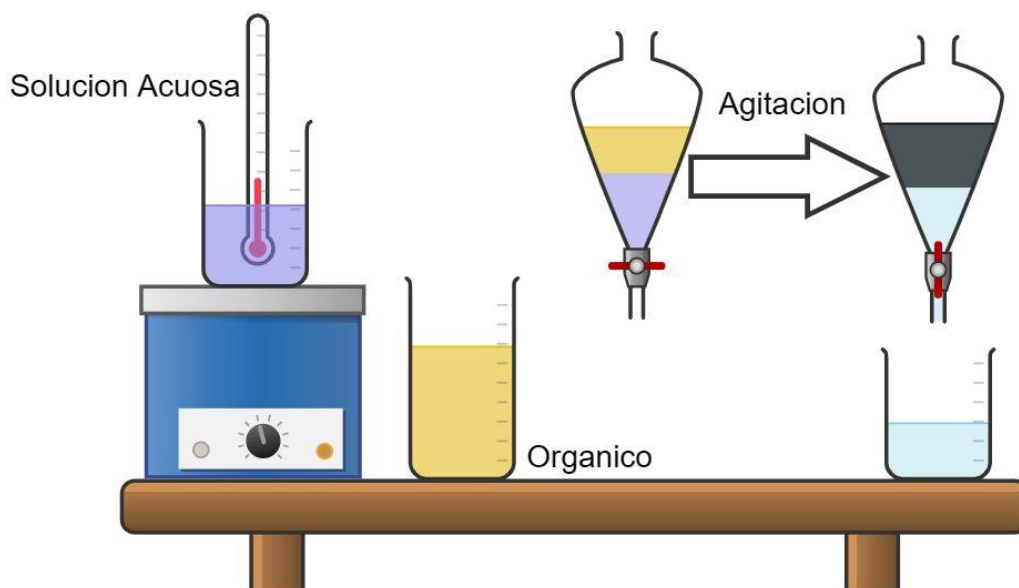


Figura 3.1. Esquema resumido del montaje de una prueba de extracción.

Tabla 3.1: Plan de pruebas para isothermas de extracción.

N° Prueba	Razón O/A
1	15/1
2	12/1
3	8/1
4	5/1
5	3/1
6	2/1
7	1/1
8	2/3
9	1/2

3.2.2 Pruebas isoterma re-extracción.

La preparación del orgánico cargado consistió en contactar la fase orgánica con PLS sintético que contenía 40 g/L de Cobre y 5, 10 y 20 g/L de H_2SO_4 . Se utilizó una razón O/A de 1/1 y se mezclaron por 5 minutos, luego de la separación de fases se vuelve a cargar la misma fase orgánica con PLS fresco, lo cual se repite hasta no tener variación en pH del acuoso.

Para la obtención de la isoterma de re-extracción se procedió de similar forma que, para la etapa de extracción, en este caso se contactó orgánico cargado con electrolito agotado en razones indicadas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Pruebas para isotermas de re-extracción.

N° Prueba	Razón O/A
1	4/1
2	2/1
3	1/1
4	1/2
5	1/4

4. Resultados

4.1 Efecto de la concentración de ácido en el PLS

Para comparar los efectos de las distintas concentraciones de ácido en la extracción de cobre se determinó experimentalmente las distintas isotermas. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.1.

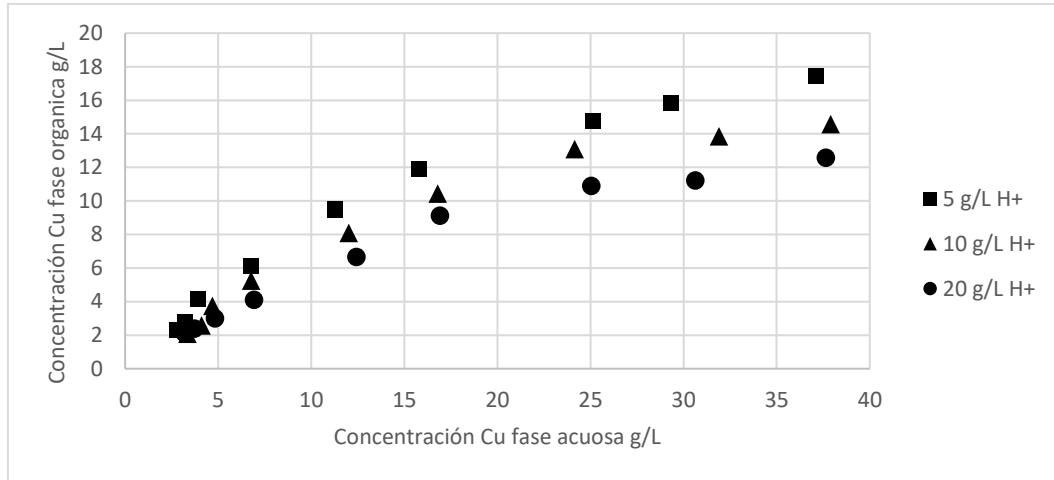
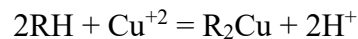


Figura 4.1. Isoterma de extracción de cobre desde un PLS 40 g/L Cu. Extractante Acorga M5640 35% v/v en Escaid 110.

De la Figura 4.1 se ve como las curvas de equilibrio se desplazan hacia abajo a medida que aumentamos la concentración de ácido en el PLS. Esto desfavorece la extracción de cobre disminuyendo la carga del extractante. Este efecto se explica a partir de la reacción (1):



$$\text{Con:} \quad K = \frac{[R_2Cu][H^+]^2}{[Cu^{2+}][RH]^2} \quad \text{y} \quad D = \frac{[R_2Cu]}{[Cu^{2+}]}$$

K constante de equilibrio y D el coeficiente de distribución.

Se obtiene:

$$\text{Log } D = \text{Log } K + 2\text{Log } [RH] - 2\text{Log}[H^+] \quad (3)$$

De donde se ve en la ecuación (3) que el coeficiente de distribución del cobre depende de la acidez y de la concentración del extractante en la fase orgánica, con el efecto negativo de la acidez. El

coeficiente de distribución tiene en su numerador la concentración de cobre en el orgánico cargado y en el denominador la concentración de cobre en el refino.

Para el posterior análisis del diagrama de McCabe Thiele, los resultados experimentales se ajustaron a curvas de la forma $y(x) = A \ln(x) + B$ como se ve en la Figura 4.2.

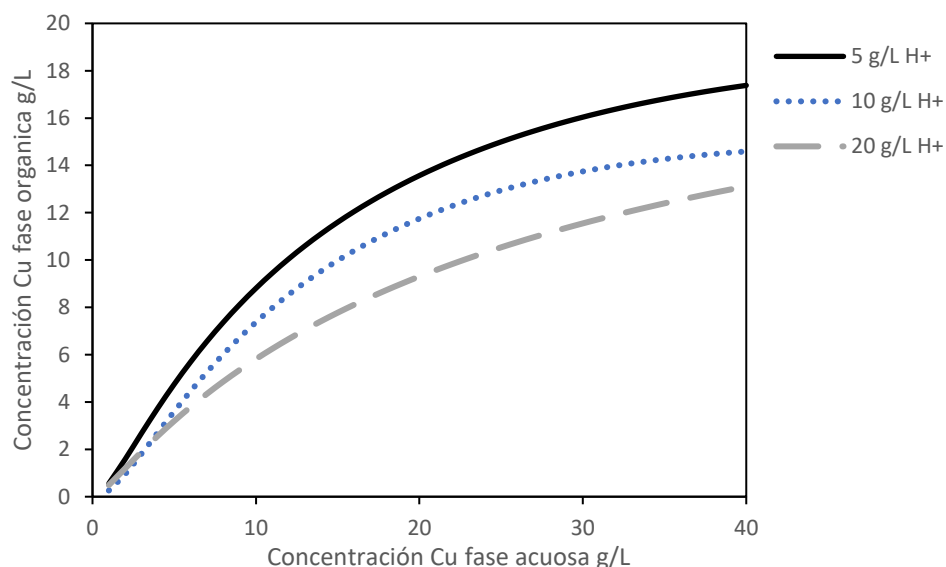


Figura 4.2. Curvas ajustadas para isotermas de extracción de PLS 40 g/L Cu. Extractante Acorga m5640 35% v/v en Escaid 110.

4.2 Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción

Para comparar la extracción de cobre a distintas temperaturas se determinó la isoterma de extracción a temperatura ambiente 20°C y a 35°C para las tres concentraciones de ácido en el PLS, los resultados se presentan en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5. Como se observa en estas Figuras, al aumentar la temperatura hay un efecto positivo en la isoterma de extracción al aumentar la carga en cobre del extractante con respecto al obtenido a menor temperatura, pero, el aumento es poco significativo (5% de mayor carga en promedio). Se puede observar que este efecto se obtuvo para las tres concentraciones de ácido en el PLS.

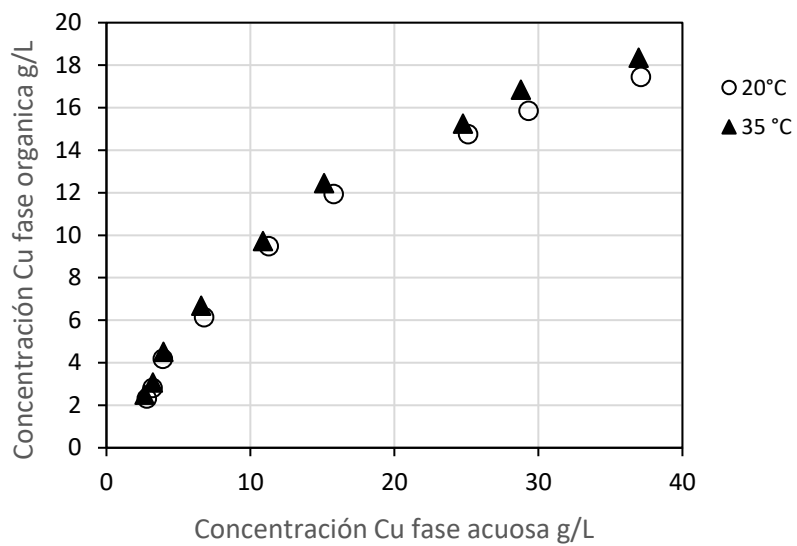


Figura 4.3: Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción para el PLS con 40 g/L de Cu y 5 g/L de H₂SO₄.

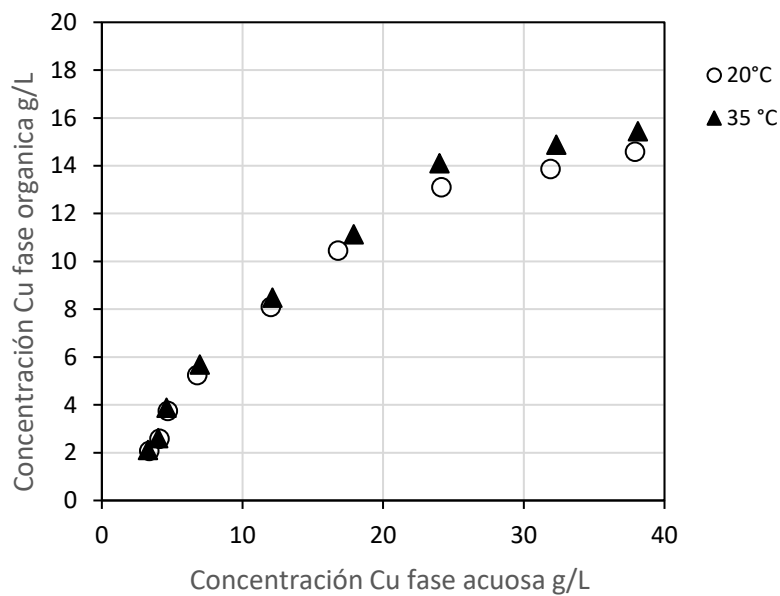


Figura 4.4: Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción para el PLS con 40 g/L de Cu y 10 g/L de H₂SO₄.

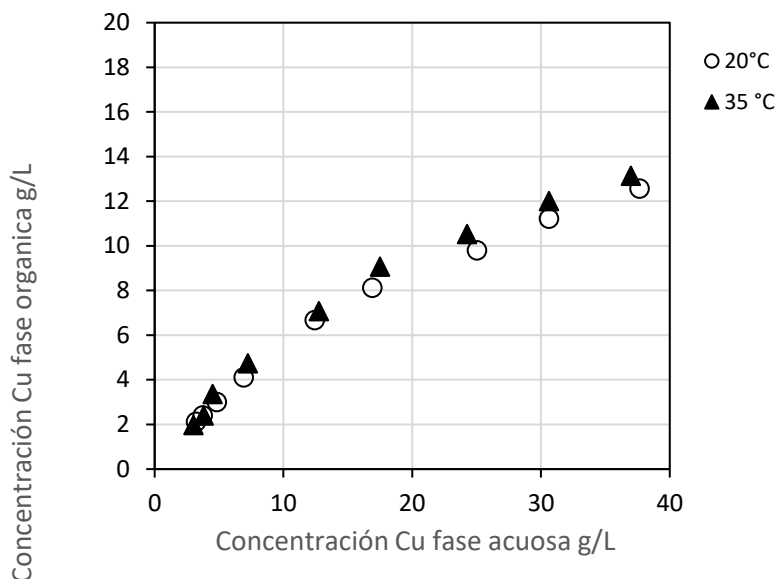


Figura 4.5: Efecto de la temperatura en la isoterma de extracción para el PLS con 40 g/L de Cu y 20 g/L de H₂SO₄.

En general el aumento de la temperatura es favorable, pues, disminuye el tiempo de separación de fases, disminuye la viscosidad, mejora la cinética y aumenta la extracción de cobre, pero, tiene la desventaja de aumentar la tasa de evaporación, aumenta la degradación del extractante y aumentan los compuestos orgánicos volátiles (Zambra, Soderstrom and Cohen, 2015). De estas ventajas y desventajas, las pérdidas por evaporación pueden ser críticas desde el punto de vista de la seguridad de una planta, pero, la decisión para definir la temperatura de operación en SX dependerá de cada caso en particular.

4.3. Isotermas de re-extracción

Para poder completar el balance de un circuito de SX completo es necesario determinar las isotermas de re-extracción. Se construyeron tres isotermas distintas para orgánicos cargados bajo las tres concentraciones de ácido distinto. Todas fueron cargadas a partir un PLS con 40 g/L de cobre, pero con concentraciones de ácido de 5, 10 y 20 g/L de H₂SO₄. El orgánico cargado fue contactado con un electrolito agotado con 35g/L Cu y 180 g/L H₂SO₄. En la figura 4.6 se ven las isotermas para estos 3 casos. Se advierte que el orgánico a medida de ser cargado con soluciones más ácidas, la curva aumenta su pendiente, favoreciendo así la re-extracción. Este efecto estaría relacionado con la menor concentración en el orgánico cargado que se obtiene al cargarlo con un PLS más ácido.

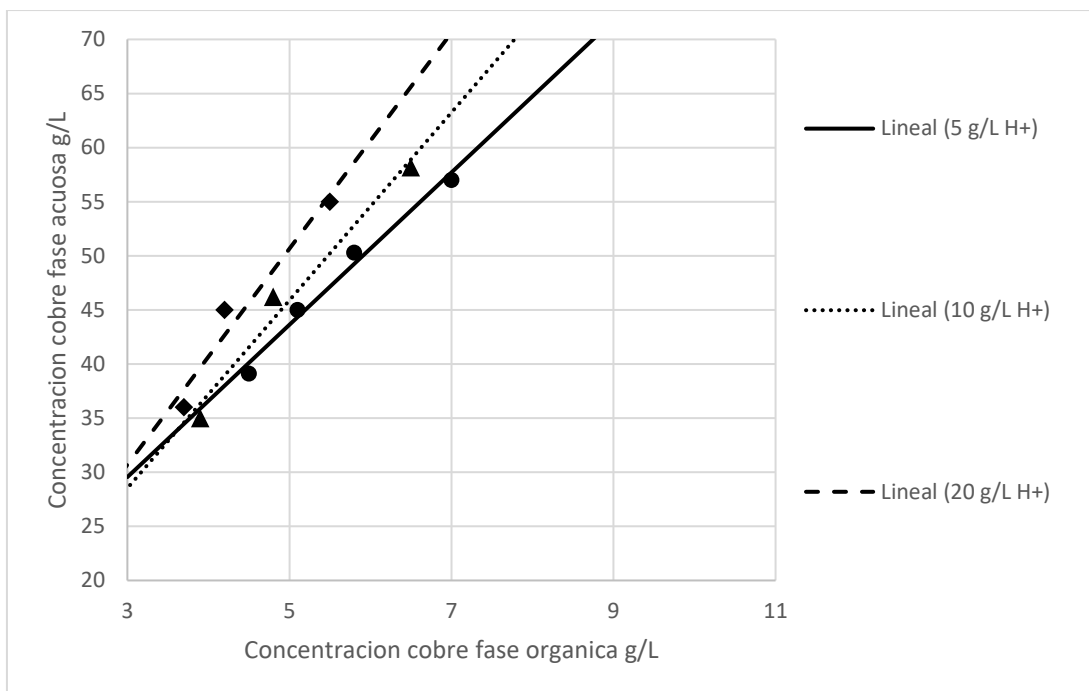


Figura 4.6. Isothermas re-extracción Acorga m5640 35% v/v con solución 35 g/L Cu y 180g/L H₂SO₄, a partir de orgánico cargado con PLS de distintas concentraciones de ácido.

4.4 Desempeño en distintas configuraciones de planta.

Para ver el desempeño del orgánico bajo distintas condiciones operacionales se consideran los parámetros indicados en la tabla 4.1. Con esto se compara el desempeño bajo distintos circuitos en contracorriente y distintas concentraciones de ácido en el PLS. Las distintas configuraciones de circuitos se observan en las Figuras 4.7 a 4.9. Con estos parámetros y las isothermas correspondientes se calcula el balance de masa de los distintos circuitos, con el cual se obtiene los resultados expuestos en la Tabla 4.2. Para los circuitos que tratan un PLS con 20 g/L de ácido se tuvo q subir la razón O/A de 4:1 a 6:1 para completar el balance. Para complementar de manera grafica los resultados de la Tabla 4.2, se presentan los diagramas McCabe-Thiele en la sección de anexos en las Figuras 9.1 a 9.9.

Tabla 4.1. Parámetros operacionales para los distintos circuitos comparados.

Configuración	3E2S; 2E2S; 2E1S
Concentración Cu PLS (g/L)	40
Concentración H ⁺ PLS (g/L)	5; 10; 20
Flujo PLS (m ³ /h)	100
Razón O/A	4; 6
Concentración Cu electrolito avanzada AE (g/L)	50
Concentración Cu electrolito agotado SE (g/L)	35
Concentración H ⁺ electrolito agotado SE (g/L)	180
Eficiencia etapas (%)	100

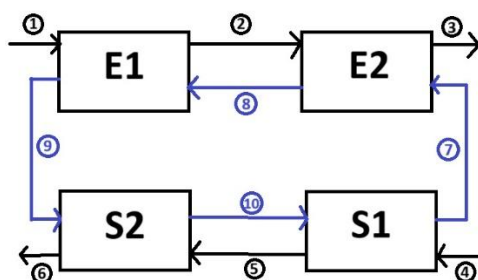


Figura 4.7: Esquema de un circuito de SX 2 etapas de extracción y 2 de re-extracción en contra corriente.

Línea negra flujos acuoso y línea azul flujo de orgánico.

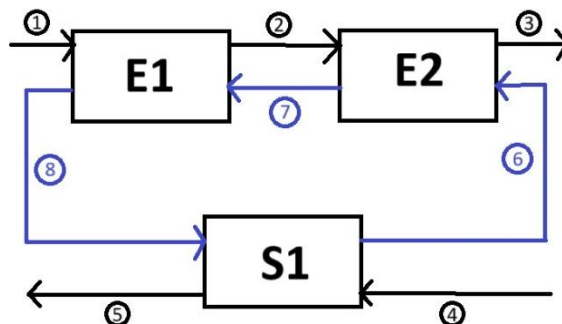


Figura 4.8: Esquema de un circuito de SX 2 etapas de extracción y 1 de re-extracción en contra corriente.

Línea negra flujos acuoso y línea azul flujo de orgánico.

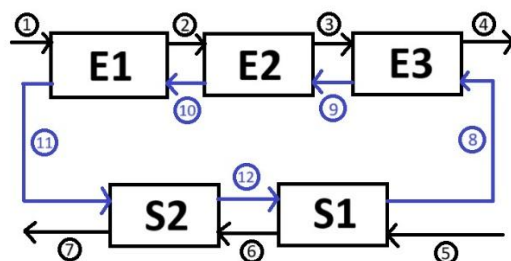


Figura 4.9: Esquema de un circuito de SX 3 etapas de extracción y 2 de re-extracción en contra corriente.

Línea negra flujos acuoso y línea azul flujo de orgánico.

Considerando las etapas de extracción, vemos que de acuerdo con lo presentado en Tabla 4.2, las operaciones con 10 g/L de H^+ disminuyen el porcentaje de extracción en 4,7% promedio con respecto a las operaciones con 5 g/L de H^+ . También, se ve que la transferencia neta (diferencia entre orgánico cargado y descargado) cae en promedio 0,48 g/L de cobre con un aumento de 5 g/L a 10 g/L de H^+ en el PLS. Además, se evidencia una disminución en el electrolito tratado en los circuitos de 10 g/L de H^+ con respecto a los circuitos de 5 g/L H^+ . Los detalles de las concentraciones de todos los flujos intermedios de los circuitos se encuentran en la sección de anexos 9.3.

Tabla 4.2. Resultados para distintas configuraciones de circuito y concentración de ácido en el PLS.

H^+ PLS (g/L)	Configuración circuito	O/A ext.	Cu refino (g/L)	% extracción	Transferencia neta (g/L)	Flujo electrolito
5	3E2S	4	5,17	87	8,7	232,18
5	2E2S	4	7,12	82,2	8,22	219,19
5	2E1S	4	9,53	76,2	7,62	203,12
10	3E2S	4	6,77	83,1	8,31	221,55
10	2E2S	4	9,13	77,2	7,72	205,79
10	2E1S	4	11,66	70,8	7,08	188,93
20	3E2S	6	6,92	82,7	5,51	220,52
20	2E2S	6	9,04	77,4	5,16	206,38
20	2E1S	6	11,69	70,8	4,72	188,72

4.5. Caracterización de refino.

Como se ve en la Tabla 4.2 todos los refinados contienen cantidades importantes de cobre, por sobre al contenido de cobre en muchas soluciones tratadas en operaciones actuales (Schlesinger et al., 2003), por lo que su posterior tratamiento puede ser necesario. Para esto, es importante conocer la cantidad de ácido que tienen estas soluciones. Como se vio en la ecuación (1) por cada gramo de cobre extraído se generan 1,54 g de H_2SO_4 . Estos resultados se muestran en la Tabla 4.3, donde se advierte concentraciones muy elevadas de ácido para ser tratadas en SX de manera directa.

Tabla 4.3. Caracterización refinados obtenidos en distintas configuraciones.

Concentración H^+ PLS (g/L)	Configuración circuito	O/A ext.	Cu refino (g/L)	$[H_2SO_4]$ refino (g/L)
5	3E2S	4	5,17	58,63
5	2E2S	4	7,12	55,63
5	2E1S	4	9,53	51,92
10	3E2S	4	6,77	61,18
10	2E2S	4	9,13	57,54
10	2E1S	4	11,66	53,64
20	3E2S	6	6,92	70,94
20	2E2S	6	9,04	67,67
20	2E1S	6	11,69	63,59

5. Discusiones.

De las isotermas de extracción (Figuras 4.1 y 4.2) se observa un desplazamiento “hacia abajo” a medida que sube la concentración de ácido en el PLS. Esto porque al aumentar la concentración de ácido libre el equilibrio de la ecuación (1) se desplaza hacia los reactivos, por lo que el cargado del orgánico se desfavorece. A consecuencia de esto, se obtiene un orgánico cargado menos concentrado en cobre a medida que sube la concentración de ácido, lo que genera que las isotermas de re-extracción (Figura 4.6) se desplacen “hacia arriba” a medida que sube la concentración de ácido en la solución con la que fue cargado el orgánico.

Para los circuitos estudiados con parámetros indicados en la Tabla 4.1, un aumento de 5 g/L de ácido a 10 g/L de ácido en el PLS significa una disminución de 4,7% de extracción en promedio. Además, la transferencia neta disminuye en 0,48 g/L en promedio. Por último, en promedio, los circuitos con 5 g/L de ácido pueden tratar un 6,2% más de electrolito en comparación con los circuitos con 10 g/L de ácido.

Una tercera etapa de extracción aumenta el porcentaje de extracción en promedio 5,3%. Además, aumenta la transferencia neta en promedio 0,47 g/L. Por último, una tercera etapa de extracción genera, en promedio, 6,8% más de electrolito.

Una segunda etapa de re-extracción aumenta el porcentaje de extracción en promedio 6,3%. Además, aumenta la transferencia neta en promedio 0,56 g/L. Por último, la segunda etapa de re-extracción genera, en promedio, 8,7% más de electrolito.

De estas 3 posibilidades (agregar etapa de extracción, re-extracción o disminuir la concentración de ácido en PLS) La que tiene mejor desempeño es la adición de una segunda etapa de re-extracción, seguida por agregar una tercera etapa de extracción y por último la de disminuir el contenido de ácido libre en el PLS. Estas 3 alternativas mejoran los desempeños al usar de manera más eficiente la fase orgánica.

Los refinados obtenidos en estos supuestos contienen contenidos elevados de cobre, desde 5 g/L hasta 11 g/L, y se recirculan a la etapa previa de lixiviación.

6. Conclusiones.

De los resultados obtenidos se concluye que el extractante Acorga M5640 permite extraer gran porcentaje de cobre bajo condiciones de acidez y concentración esperadas en un PLS proveniente del tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre con eficiencias de extracción entre 70% a 87%.

El aumento de la acidez en el PLS afecta de forma negativa al desempeño del extractante, disminuyendo su capacidad de carga lo que trae como consecuencia un uso menos eficiente de orgánico, expresado en una menor transferencia neta, por ejemplo, para un PLS de 40 g/L de cobre y un contenido de H_2SO_4 de 5 g/L la extracción de cobre disminuye un 4,7% si la concentración de ácido en el PLS sube a 10 g/L, además, la transferencia neta disminuye en 0,48 g/L en promedio.

En la simulación de un circuito de SX se evaluó el efecto de aumentar de 2 a 3 las etapas de extracción, subir de 1 a 2 las etapas de re-extracción y disminuir en 5 g/L la concentración de ácido en el PLS, resultando más favorable el agregar una segunda etapa de re-extracción en cuanto a las variables estudiadas, % extracción, transferencia neta y flujo de electrolito tratado. Esto deja de lado el aspecto económico de el costo de estas tres alternativas que se tiene que poner en la balanza a la hora de poder concluir de manera más definitiva.

Al aumentar la temperatura desde 20 a 35°C, aumentó la capacidad de carga del orgánico en un 5% promedio entre todas las concentraciones de ácido de PLS. Si bien, esto puede significar un aumento sustancial hay que contraponerlo con otros factores no controlados en este estudio como degradación extractante, tasa de evaporación y un aumento de compuestos orgánicos volátiles.

Los refinados calculados contienen concentraciones elevadas de cobre, lo que no es un problema complejo, debido a que se trabaja en circuito cerrado LIX – SX recirculando el refino.

7. Glosario

SX: Se refiere al proceso de separación líquido-líquido conocido como extracción por solvente. Solvent extraction en inglés.

Lixiviación: Proceso de extracción de sustancias de un sólido por medio de disolventes líquidos.

PLS: Solución obtenida en la lixiviación que contiene el (los) metal(es) de interés disueltos. PLS por su nombre en inglés “pregnant leach solution”.

EW: Electrowinning es el proceso de recuperación de metales en solución por medio del paso de una corriente eléctrica.

%v/v: Porcentaje en volumen.

8. Referencias.

- Schlesinger, M., Davenport, W. G., King, M., & Biswas, A. K. (2003). Solvent extraction. En Extractive metallurgy of copper (4th ed.). Elsevier Science.
- Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2024). Proyección de la producción de cobre en Chile 2024–2034.
- Dreisinger, D. (2006). Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper. Hydrometallurgy, 10-20.
- Zambra, R., Soderstrom, M. & Cohen, L., (2015). SX considerations for the treatment of concentrate leach solutions; Hydroprocess.
- Ruiz, M., (2013). Tecnología de purificación de soluciones: Extracción por solventes. Universidad de Concepción.
- Sole, K. C., (2002). Solvent extraction of copper from high concentration pressure acid leach liquors. En Proceedings of the International Solvent Extraction Conference, ISEC 2002

9. Anexos

9.1 Pruebas isotermas extracción

Tabla 9.1: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 5 g/L 35°C

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
2,6	2,5
3,2	3,1
3,9	4,5
6,6	6,7
10,9	9,7
15,1	12,4
24,8	15,2
28,8	16,8
36,9	18,4

Tabla 9.2: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 5 g/L 20°C

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
2,8	2,3
3,2	2,8
3,9	4,2
6,8	6,1
11,3	9,5
15,8	11,9
25,1	14,8
29,3	15,8
37,1	17,5

Tabla 9.3: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 10 g/L 35°C

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
3,3	2,1
4,0	2,6
4,6	3,9
7,0	5,7
12,1	8,5
17,9	11,1
24,0	14,1
32,3	14,9
38,1	15,5

Tabla 9.4: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 10 g/L 20°C

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
3,4	2,1
4,1	2,6
4,7	3,7
6,8	5,3
12,0	8,1
16,8	10,5
24,1	13,1
31,9	13,9
37,9	14,6

Tabla 9.5: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 20 g/L 35°C

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
3,0	2,0
3,8	2,4
4,5	3,4
7,2	4,7
12,8	7,1
17,5	9,1
24,3	10,5
30,6	12,0
37,0	13,1

Tabla 9.6: Datos para construcción isoterma de extracción. Ácido PLS 20 g/L 20°C

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
3,2	2,1
3,7	2,4
4,8	3,0
6,9	4,1
12,4	6,7
16,9	8,1
25,0	9,8
30,6	11,2
37,6	12,6

9.2: Isotermas re-extracción

Tabla 9.7: Datos para isoterma de re-extracción con orgánico cargado de un PLS con 5 g/L Ácido sulfúrico.

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
45,0	5,1
50,3	5,8
57,0	7,0
39,1	4,5

Tabla 9.8: Datos para isoterma de re-extracción con orgánico cargado a partir de un PLS con 10 g/L Ácido sulfúrico.

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
35,0	3,9
46,2	4,8
58,2	6,5

Tabla 9.9: Datos para isoterma de re-extracción con orgánico cargado a partir de un PLS con 20 g/L Ácido sulfúrico.

Concentración Cu en acuoso (g/L)	Concentración Cu en orgánico (g/L)
36,0	3,7
45,0	4,2
55,0	5,5

9.3 Diagramas McCabe-Thiele.

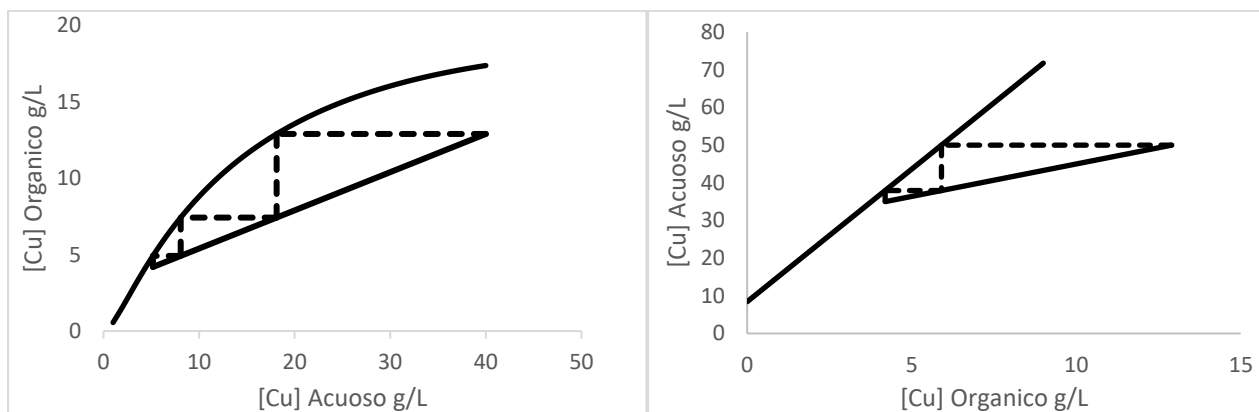


Figura 9.1. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 3E2S para un PLS con $[H^+]=5g/L$.

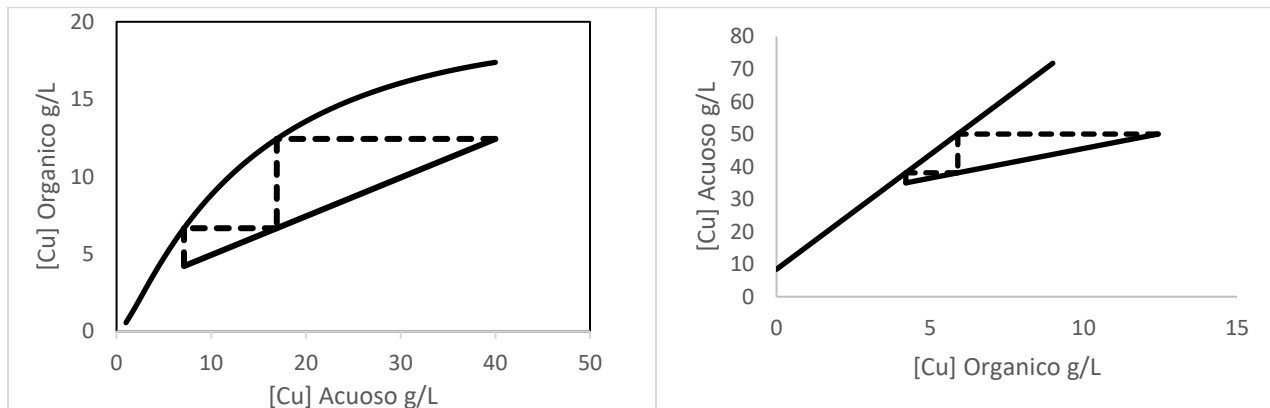


Figura 9.2. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E2S para un PLS con $[H^+]=5g/L$.

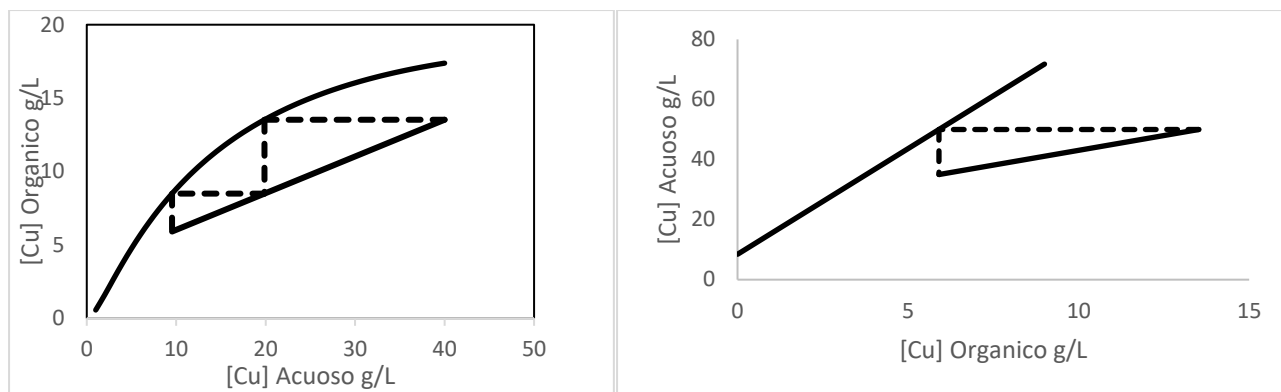


Figura 9.3. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E1S para un PLS con $[H^+] = 5 \text{ g/L}$.

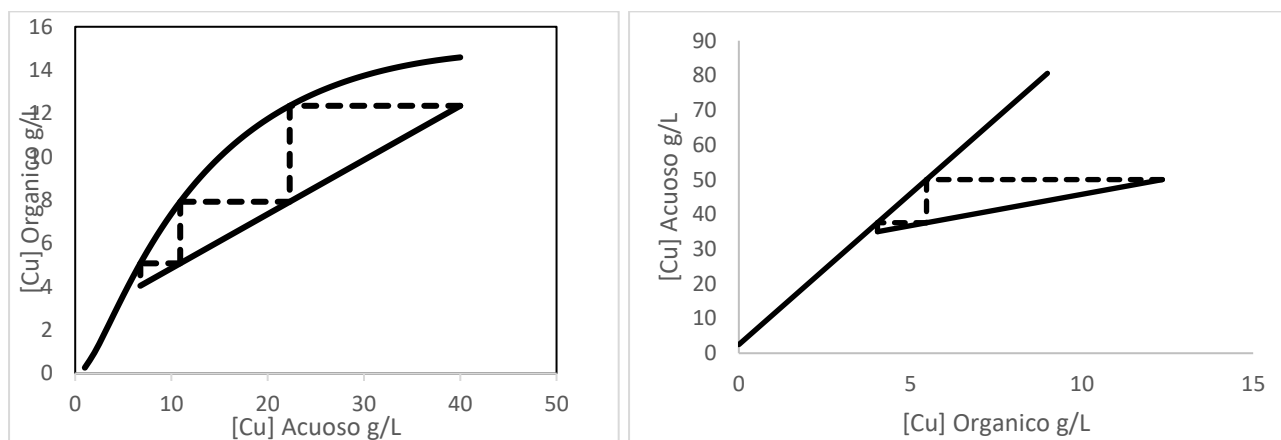


Figura 9.4. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 3E2S para un PLS con $[H^+] = 10 \text{ g/L}$.

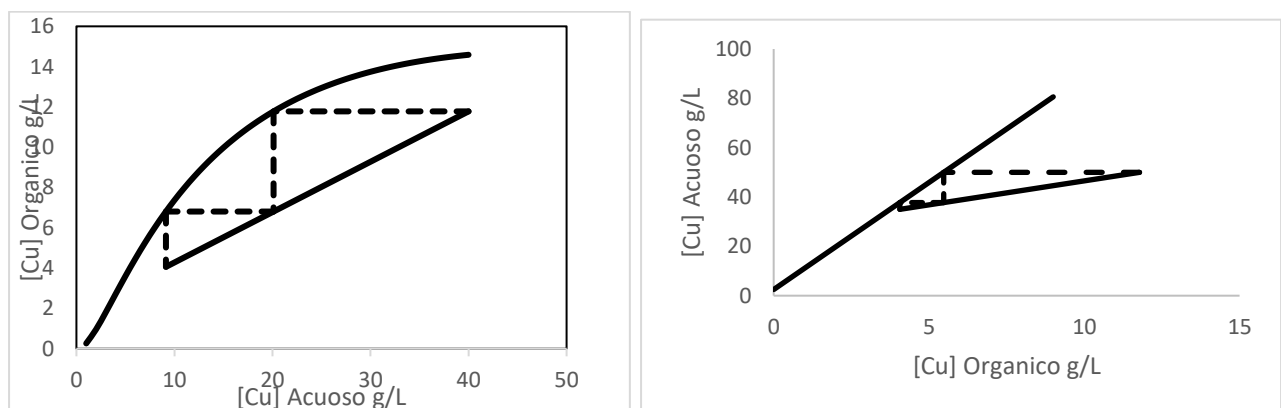


Figura 9.5. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E2S para un PLS con $[H^+] = 10 \text{ g/L}$.

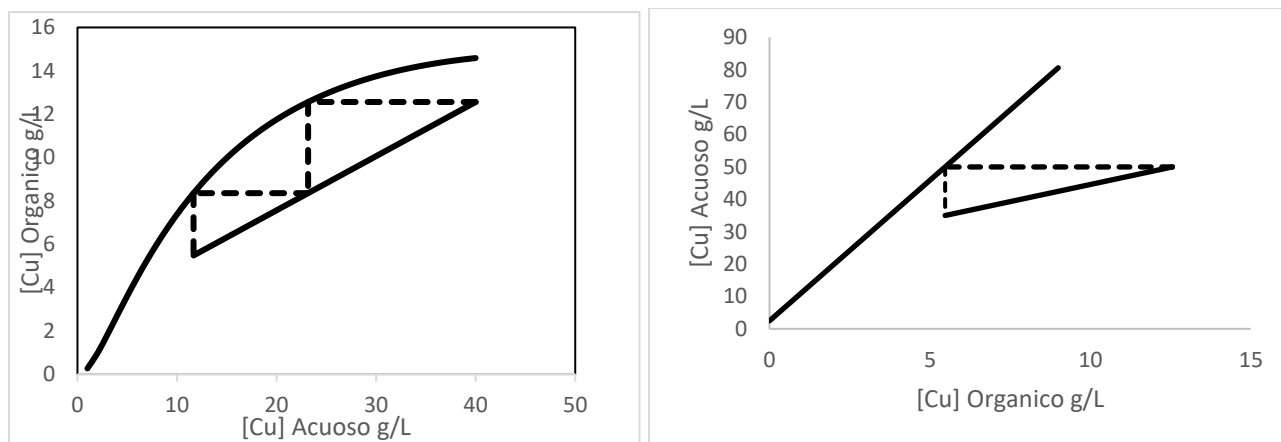


Figura 9.6. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E1S para un PLS con $[H^+]=10\text{g/L}$.

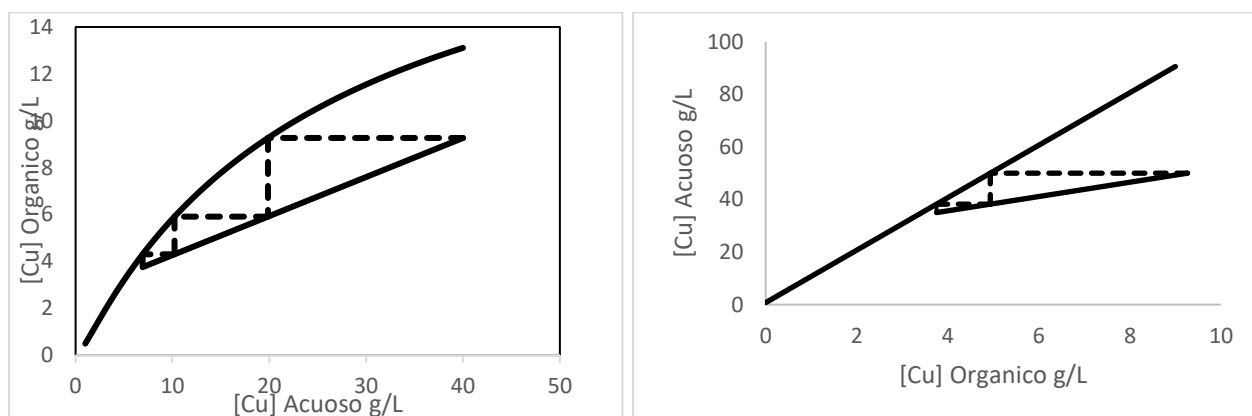


Figura 9.7. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 3E2S para un PLS con $[H^+]=20\text{g/L}$.

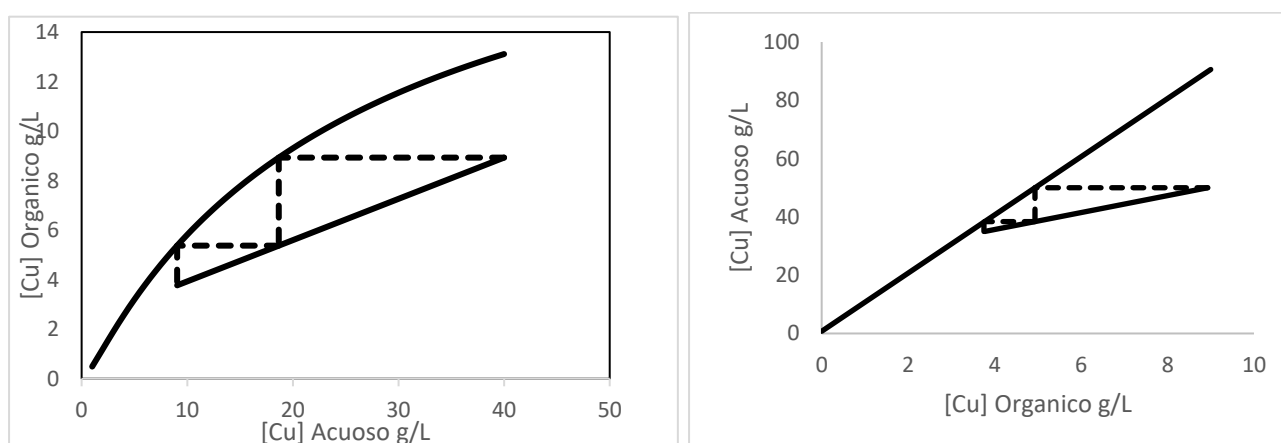


Figura 9.8. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E2S para un PLS con $[H^+]=20\text{g/L}$.

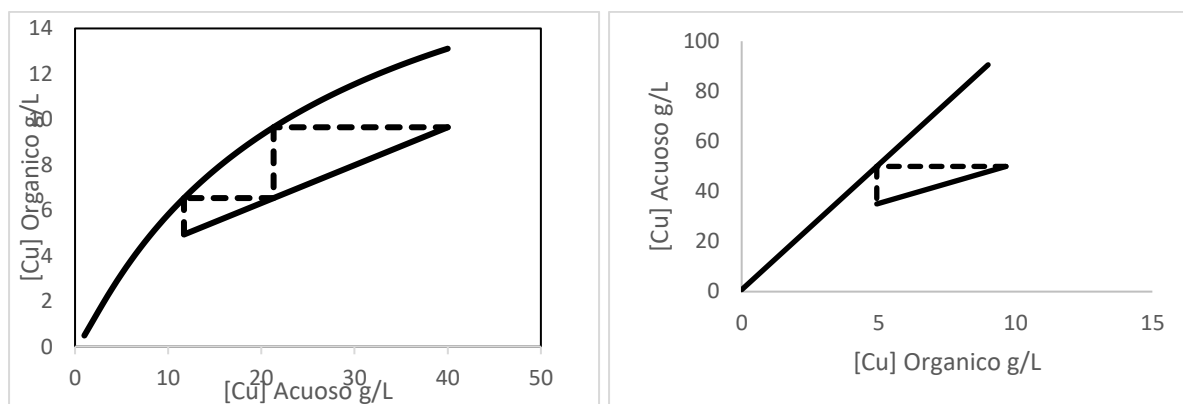


Figura 9.9. Diagramas McCabe-Thiele para configuración 2E1S para un PLS con $[H^+]=20\text{g/L}$.

9.4 Detalles balance de cobre.

Tabla 9.10: Detalles balance Cu para PLS 5 g/L H_2SO_4 configuración 2E2S.

Balance Cu. PLS 5 g/L H_2SO_4		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m^3/h)
1	40	100
2	16,92	100
3	7,12	100
4	35	219,19
5	38,09	219,19
6	50	219,19
7	4,21	400
8	6,66	400
9	12,43	400
10	5,91	400

Tabla 9.11: Detalles balance Cu para PLS 10 g/L H₂SO₄ configuración 2E2S.

Balance Cu. PLS 10 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	20,11	100
3	9,13	100
4	35	205,79
5	37,74	205,79
6	50	205,79
7	4,06	400
8	6,81	400
9	11,78	400
10	5,57	400

Tabla 9.12: Detalles balance Cu para PLS 20 g/L H₂SO₄ configuración 2E2S.

Balance Cu. PLS 20 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	18,67	100
3	9,04	100
4	35	206,38
5	38,38	206,38
6	50	206,38
7	3,77	600
8	5,47	600
9	8,93	600
10	4,93	600

Tabla 9.13: Detalles balance Cu para PLS 5 g/L H₂SO₄ configuración 2E1S.

Balance Cu. PLS 5 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	19,86	100
3	9,53	100
4	35	203,13
5	50	203,13
6	5,91	400
7	8,49	400
8	13,52	400

Tabla 9.14: Detalles balance Cu para PLS 10 g/L H₂SO₄ configuración 2E1S.

Balance Cu. PLS 10 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	23,17	100
3	11,66	100
4	35	188,93
5	50	188,93
6	5,47	400
7	8,35	400
8	12,56	400

Tabla 9.15: Detalles balance Cu para PLS 20 g/L H₂SO₄ configuración 2E1S.

Balance Cu. PLS 20 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	21,31	100
3	11,69	100
4	35	188,71
5	50	188,71
6	4,93	600
7	6,54	600
8	9,65	600

Tabla 9.16: Detalles balance Cu para PLS 5 g/L H₂SO₄ configuración 3E2S.

Balance Cu. PLS 5 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	18,11	100
3	8,08	100
4	5,17	100
5	35	232,18
6	37,95	232,18
7	50	232,18
8	4,19	400
9	4,91	400
10	7,43	400
11	12,90	400
12	5,91	400

Tabla 9.17: Detalles balance Cu para PLS 10 g/L H₂SO₄ configuración 3E2S.

Balance Cu. PLS 10 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	22,28	100
3	10,91	100
4	6,77	100
5	35	221,55
6	37,58	221,55
7	50	221,55
8	4,04	400
9	5,08	400
10	7,92	400
11	12,35	400
12	5,47	400

Tabla 9.18: Detalles balance Cu para PLS 20 g/L H₂SO₄ configuración 3E2S.

Balance Cu. PLS 20 g/L H ₂ SO ₄		
Nro. Flujo	Concentración Cu (g/L)	Flujo (m ³ /h)
1	40	100
2	19,86	100
3	10,21	100
4	6,92	100
5	35	220,53
6	38,21	220,53
7	50	220,53
8	3,75	600
9	4,30	600
10	5,91	600
11	9,27	600
12	4,93	600

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: EVALUACIÓN DE UN CIRCUITO DE SX PARA SOLUCIONES CONCENTRADAS DE COBRE UTILIZANDO EXTRACTANTE ACORGA M5640

Nombre Memorista: Tomas Eugenio Rioseco Maldonado

Modalidad	Proyecto	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		Prof. Fernando Parada
Calificación		
Fecha	18/08/2025	
Prof. Froilán Vergara G.		
		Institución:

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. ^a Araneda	Prof. Yepsen
----------------------------	--------------

Resumen

Este trabajo analiza la purificación de soluciones obtenidas de la lixiviación de concentrados sulfurados de cobre mediante extracción por solventes (SX). El método SX separa el cobre aprovechando su distinta solubilidad en dos fases inmiscibles: una acuosa (PLS) con el metal disuelto y una orgánica con el extractante. Se utilizó Acorga M5640 al 35% v/v en Escaid 110.

El estudio evaluó el efecto de la acidez y la temperatura en la etapa SX. Para ello se prepararon soluciones sintéticas de PLS con 35 g/L de cobre y concentraciones de H₂SO₄ de 5, 10 y 20 g/L. Se obtuvieron isotermas de extracción y re-extracción, que luego sirvieron para simular balances de masa en diferentes configuraciones operacionales.

Los resultados mostraron una alta eficiencia de extracción (70%–87%) en todas las condiciones. Sin embargo, un mayor contenido de ácido redujo tanto el porcentaje de cobre extraído como la eficiencia de la fase orgánica.