

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesores Patrocinantes
Dra. María Cristina Ruiz
Dr. Rafael Padilla

**EFFECTO DE AGUA DE MAR Y CLORURO DE SODIO EN LA EXTRACCION POR SOLVENTES
DE COBRE UTILIZANDO EL REACTIVO ACORGA M5910**



Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Octubre,2018

Resumen

El presente informe es parte del proyecto FONDECYT 1150343 donde se estudió el efecto de la presencia de cloruro de sodio y agua de mar en las soluciones acuosas utilizadas en extracción por solventes de cobre, empleando como reactivo orgánico el extractante Acorga M5910. El objetivo principal fue cuantificar la incidencia del ion cloruro en las distintas etapas que conllevan la extracción por solventes. Para lograrlo se realizaron pruebas utilizando soluciones acuosas con distintas concentraciones de cloruro, preparadas con agua destilada y/o agua de mar para determinar equilibrio de extracción, re-extracción y tiempo de separación de fases

Las pruebas fueron realizadas utilizando como fase orgánica el extractante Acorga M5910 al 26% v/v diluido en Escaid 110 y como fase acuosa se utilizó un PLS que contenía 6g/L de Cu^{2+} , 5g/L de Fe^{2+} y 2g/L de Fe^{3+} con concentraciones totales de ion cloruro de 0 g/L, 19.6 g/L (agua de mar), 60 g/L y 110 g/L a $\text{pH}=2$.

En la etapa de extracción se comprobó que el aumento de temperatura incidía positivamente en la extracción de cobre ya que generó un desplazamiento del equilibrio de la reacción 1 hacia el lado derecho de ella, mientras que el ion cloruro tuvo un efecto negativo en el equilibrio de extracción, asociado principalmente a la formación de clorocomplejos lo que resultó en pérdida de capacidad de extracción a medida que se aumentó su concentración.

En re-extracción el aumento de la temperatura de 25 a 35°C perjudicó la descarga, mientras que el aumento de acidez en el electrolito (spent) tuvo una incidencia positiva en ella.

De la separación de fases se obtuvo que a medida que se aumentó la concentración de ion cloruro en las soluciones acuosas, el tiempo de separación de fases aumento. Por otro lado, al aumentar la temperatura de operación, se obtuvo que los tiempos de separación de fases fueron menores.

En lo que concierne al reactivo orgánico utilizado, se comprobó su altísima selectividad por el Cu sobre la del Fe. El orden de extracción de Fe en la razón O/A 1:1 fue de 1.6 ppm mientras que de Cu fue 1168 ppm.

Abstract

The present work is part of project FONDECYT N°1150343 where it was studied the effect of sodium chloride and sea water in aqueous solutions used in copper solvent extraction, using the organic reactive Acorga M5910. The main objective was quantify the incidence of chloride ion in the diferents stages of solvent extraction process. To get it were carried out tests using aqueous solutions with diferents chloride concentrations, prepared with distilled water and sea water for determinate the extraction equilibrium, stripping equilibrium and phase separation times.

The experimental tests were carried out using as organic phase the extractant Acorga M5910 that was diluted to 26% v/v in Escaid 110 and as aqueous phase a PLS what contained 6g/L de Cu^{2+} , 5g/L de Fe^{2+} y 2g/L de Fe^{3+} with concentrations of chloride ion 0g/L, 19,6 g/L ,60g/L or 110g/L, being adjusted to pH=2.

In the extraction stage it was found that the increase in temperature had a positive effect on the extraction of copper since it generated a displacement of the balance of reaction 1 towards the right side of it, while the chloride ion had a negative effect on the extraction equilibrium, mainly associated with the formation of chlorocomplexes which resulted in the loss of extraction capacity as its concentration was increased.

In stripping stage, the increase in temperature from 25 to 35 ° C impaired the discharge, while that acidity increased in the electrolyte (spent) had a positive impact on it.

From the phase separation was found it that as the concentration of chloride ion in the aqueous solutions was increased, the phase separation time increased and when increased the operation temperature, it was obtained that the separation times were lower.

The organic reagent used proved its high selectivity for Cu over that of Fe. The order of extraction of Fe in the ratio O / A 1: 1 was 1.6 ppm while that of Cu was 1168 ppm.

INDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
2. ANTECEDENTES GENERALES.	2
2.1. FASE ORGÁNICA.	3
2.1.1Hidroxioximas utilizadas en la extracción de cobre	3
2.1.2Diluyente:	5
2.1.3 Modificadores.....	5
2.2 FASE ACUOSA:.....	5
2.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES.	6
3. CARACTERIZACIÓN DEL EQUILIBRIO EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES	6
3.1 ISOTERMAS DE EQUILIBRIO:	6
3.2 COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN	7
3.3 INFLUENCIA DEL PH EN EL COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN:	7
3.4 SELECTIVIDAD:	8
4. ANTECEDENTE SOBRE LA SEPARACIÓN DE FASES DE UNA DISPERSIÓN	9
4.1 FORMACIÓN DE UNA DISPERSIÓN Y CONTINUIDAD.....	9
5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
5.1 INVESTIGACIONES SOBRE EXTRACCIÓN POR SOLVENTES DE COBRE CON HIDROXIOXIMAS.....	10
6. DESARROLLO EXPERIMENTAL	13
6.1 REACTIVOS.....	13
Fases acuosas:	13
Fase orgánica:	14
6.2 EQUIPAMIENTO	14
6.2.1Pruebas de equilibrio de extracción y re-extracción.	14
6.2.2 Pruebas de separación de fases.....	15
6.2.3 Pruebas de caracterización del orgánico y acuoso.	16
7 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	17
7.1 PRUEBAS DE EQUILIBRIO DE EXTRACCIÓN	17
7.2 PRUEBAS DE EQUILIBRIO DE RE-EXTRACCIÓN.....	18

7.3 PRUEBAS DE SEPARACIÓN DE FASES	19
7.4. CARACTERIZACIÓN DE SOLUCIONES.....	20
7.5. LAVADO DEL ORGÁNICO	20
8. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	21
8.1 ISOTERMAS DE EXTRACCIÓN	21
8.1.1 Efecto de la temperatura	21
8.1.2 Efecto de la concentración de cloruro.....	24
8.1.3 Acidez en las soluciones en el equilibrio.....	25
8.1.4 Selectividad Cu-Fe	27
8.2 ISOTERMAS RE-EXTRACCIÓN	28
8.3 SEPARACIÓN DE FASES.....	31
8.3.1 Propiedades físicas de las fases.....	31
8.3.2 Efecto de la concentración de cloruro en la separación de fases.....	32
8.3.3 Efecto de la temperatura en la separación de fases.....	34
8.4 LAVADO ORGÁNICO.....	34
9. CONCLUSIONES	35
10. BIBLIOGRAFÍA	37
11. ANEXOS	38
10.1 MASA DE REACTIVOS	38
10.2 PRUEBAS ISOTERMAS DE EXTRACCIÓN	38
10.3 PRUEBAS ISOTERMAS RE-EXTRACCIÓN.....	41
10.4 PRUEBAS SEPARACIÓN DE FASES	44
10.5 SELECTIVIDAD EN LA EXTRACCIÓN DE HIERRO	50
10.6 CARACTERIZACIÓN	52

INDICE FIGURAS

Figura 1: Recuperación de cobre mediante lixiviación- extracción por solventes- electrolisis.....	3
Figura 2:Estructura química general de las hidroxioximas aromáticas usadas comercialmente para la extracción de cobre.	4
Figura 3: Equipo mezclador- decantador para SX.	6
Figura 4:Tipos de isotermas.	7
Figura 5:Isotermas de pH para lix 84.....	8
Figura 6: Representación de la continuidad de una dispersión.	9
Figura 7:Equipamiento de las pruebas de extracción.	14
Figura 8:Sistema para medir la separación de fases.....	15
Figura 9:Densímetro Mettler Toledo DA-100M.....	16
Figura 10:Tensiómetro Kruss.....	16
Figura 11: Viscosímetro Cannon-Fenske	17
Figura 12:Isotermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con agua destilada 0 g/L de Cl ⁻ total a 25 y 35 °C.....	21
Figura 13:Isotermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con agua de mar con 19.6 g/L Cl ⁻ total a 25 y35°C.	22
Figura 14:Isotermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con agua de mar con 60 g/L de Cl ⁻ total a 25 y 35 °C.	22
Figura 15:Isotermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con 110g/L de cloruro total a 25 y 35 °C con agua de mar.	23
Figura 16:Isotermas de extracción de cobre con Acorga M5910 26%v/v a 25°C, para soluciones acuosas con distintas concentraciones de cloruro.....	24
Figura 17:Isotermas de extracción de cobre con Acorga M5910 26%v/v a 35°C, para soluciones acuosas con distintas concentraciones de cloruro.....	24
Figura 18:pH vs concentración de cobre de la solución acuosa después del contacto a 25°C en las pruebas de equilibrio de extracción.	26
Figura 19:pH vs concentración de cobre de la solución acuosa después del contacto a 35°C en las pruebas de equilibrio de extracción.	27
Figura 20:Isotermas de re-extracción del Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu ²⁺ y ácido sulfúrico 180 g/L.	28
Figura 21:Isotermas de re-extracción del Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu ²⁺ y ácido sulfúrico 190 g/L.	29

Figura 22: Isotermas de re-extracción del Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 200 g/L.	29
Figura 23: Isotermas de re-extracción a 25°C para Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 180, 190 y 200 g/L.	30
Figura 24: Isotermas de re-extracción a 35°C para Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 180, 190 y 200 g/L.	30
Figura 25: Posición de la interfase acuoso/dispersión en función del tiempo. Prueba en agua destilada con 0 g/L de Cl^- total.	32
Figura 26: Posición de la interfase acuoso/dispersión en función del tiempo. Prueba en agua destilada con 60 g/L de Cl^- total.	33
Figura 27: Posición de la interfase acuoso/dispersión en función del tiempo. Prueba en agua de mar con 60 g/L de Cl^- total.	33



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de las hidroxioximas aromáticas usadas comercialmente para la extracción de cobre.....	4
Tabla 2: Composición del agua de mar.....	13
Tabla 3: Volúmenes de fases acuosa y orgánica usadas en las pruebas de equilibrio de extracción.	18
Tabla 4: Volúmenes de fases acuosa y orgánica para pruebas de equilibrio de re-extracción.	19
Tabla 5: Variables operacionales.....	19
Tabla 6: Extracción de Fe y Cu para una fase acuosa con agua destilada 60 g/L de Cl ⁻ total a 25 y 35 °C.....	27
Tabla 7: Densidad y viscosidad de soluciones acuosas iniciales.	31
Tabla 8: Densidad y viscosidad de soluciones acuosas después del contacto.	31
Tabla 9: Densidad y viscosidad de soluciones orgánicas.....	32
Tabla 10: Tiempos de Separación de fases.....	34
Tabla 11: Pruebas lavado de orgánico.....	34
Tabla 12: Masa de reactivos usada en la preparación de PLS.....	38
Tabla 13: Masa de sal a distintas concentraciones agregadas al PLS.	38
Tabla 14: Datos Figura 12: Isoterma Agua destilada 25°C.....	38
Tabla 15: Datos Figura 12: Isoterma Agua destilada 35°C.....	39
Tabla 16: Datos Figura 13: Isoterma Agua de mar 19,6 g/L Cl 25°C.	39
Tabla 17: Datos Figura 13: Isoterma Agua de mar 19,6 g/L Cl 35°C.	39
Tabla 18: Datos Figura 14: Isoterma Agua de mar 60 g/L Cl 25°C.	40
Tabla 19: Datos Figura 15: Isoterma Agua de mar 110 g/L Cl 35°C.	40
Tabla 20: Datos Figura 15: Isoterma Agua de mar 110 g/L Cl 35°C.	40
Tabla 21: Datos Figura 20: Isoterma Re-extracción 180 g/L H ₂ SO ₄ a 25°C.....	41
Tabla 22: Datos Figura 20: Isoterma Re-extracción 180 g/L H ₂ SO ₄ a 35°C.....	41
Tabla 23: Datos Figura 21: Isoterma Re-extracción 190 g/L H ₂ SO ₄ a 25°C.....	41
Tabla 24: Datos Figura 21: Isoterma Re-extracción 190 g/L H ₂ SO ₄ a 35°C.....	41
Tabla 25: Datos Figura 22: Isoterma Re-extracción 200 g/L H ₂ SO ₄ a 25°C.....	42
Tabla 26: Datos Figura 22 Isoterma Re-extracción 200 g/L H ₂ SO ₄ a 35°C.....	42
Tabla 27: Datos Figura 18 y 19: Valores de pH post contacto.	42
Tabla 28: Datos Figura 18 y 19: Valores de pH post contacto.	43
Tabla 29: Datos Separación de fases agua destilada 0 g/L Cl total a 25°C.....	44
Tabla 30: Datos Separación de fases agua destilada 0g/L Cl total a 35°C.....	45

Tabla 31: Datos Separación de fases agua destilada 60g/L Cl total a 25°C.....	46
Tabla 32: Datos Separación de fases agua destilada 60g/L Cl total a 35°C.....	47
Tabla 33: Datos Separación de fases agua de mar 60 g/L Cl total a 25°C.	48
Tabla 34: Datos Separación de fases agua de mar 60 g/L Cl total a 35°C.	49
Tabla 35: Extracción de hierro en agua destilada 0 g/L Cl total a 25°C.	50
Tabla 36: Extracción de hierro agua en destilada 0 g/L Cl total a 35°C.	50
Tabla 37: Extracción de hierro en agua de mar 19.6 g/L Cl total a 25°C.	50
Tabla 38: Extracción de hierro en agua de mar 19.6 g/L Cl total a 35°C.	50
Tabla 39: Extracción de hierro en agua de mar 60 g/L Cl total a 25°C.	51
Tabla 40: Extracción de hierro en agua de mar 60 g/L Cl total a 35°C.....	51
Tabla 41: Extracción de hierro en agua de mar 110 g/L Cl total a 25°C.	51
Tabla 42: Extracción de hierro en agua de mar 110 g/L Cl total a 25°C.	51
Tabla 43: Tensión superficial e interfacial soluciones.....	52
Tabla 44: Tensión superficial soluciones acuosas post contacto.....	52
Tabla 45: Tensión superficial soluciones orgánicas.....	52
Tabla 46: Tensiones interfaciales.....	53



NOMENLATURA Y ABREVIACIONES

Cu^{2+} : Ion cúprico

Fe^{3+} : Ion férrico

Fe^{2+} : Ion ferroso

Cl^- : Ion cloruro

g: Gramos

g/L: Gramos por litro

rpm: Revoluciones por minuto

T: Temperatura($^{\circ}\text{C}$)

t: Tiempo (s)

ppm: Partes por millón

%v/v: porcentaje en volumen.



1.Introducción

La técnica de extracción por solventes (SX) ha tenido un auge desde la década de los 90 en Chile, produciendo un incremento exponencial en la producción de cobre vía hidrometalurgia. El desarrollo de nuevos extractantes orgánicos cuyas propiedades se han ido ajustando a los requerimientos operacionales, ha ayudado considerablemente al aumento en las aplicaciones comerciales de este método.

La operación de plantas de extracción por solventes en nuestro país actualmente enfrenta varios desafíos que son pertinentes al presente estudio. Entre ellos, el déficit hídrico que enfrenta la actividad minera y las distintas características que presenta la mena a tratar.

Por un lado, el déficit hídrico ha impulsado el uso de agua de mar en los distintos procesos mineros, incluyendo la extracción por solventes. Por el otro, está la presencia de cloruros de cobre en los minerales. Ambas situaciones contribuyen a la creciente presencia de iones cloruro en las soluciones a tratar mediante los distintos procesos.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar el efecto del uso de agua de mar y sales de cloruro en la extracción por solventes de cobre utilizando el extractante Acorga M5910. Específicamente se buscó determinar la influencia del ion cloruro en las etapas de extracción, re-extracción y separación de fases.

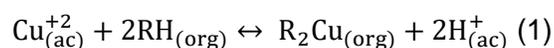
El trabajo se desarrolló de manera experimental y constó de 4 etapas que se realizaron en el laboratorio de hidrometalurgia de la Universidad de Concepción en el siguiente orden:

- 1) Determinación de isotermas de extracción.
- 2) Determinación de isotermas de re- extracción.
- 3) Determinación de pruebas de separación de fase.
- 4) Caracterización de soluciones acuosas.

2. Antecedentes Generales.

La extracción por solventes (SX), es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas, provenientes de procesos de lixiviación. Este proceso encuentra su principal aplicación en la producción de cobre, específicamente en la separación selectiva de metales, que luego se recuperan mediante el proceso de electroobtención.

Los extractantes utilizados para la extracción cobre son del tipo quelantes, los cuales son capaces de formar un ion complejo o quelato con el metal de interés, liberando un ion hidrógeno a la solución acuosa. La reacción general de extracción de cobre con este tipo de reactivos se puede escribir:



El proceso de extracción por solventes involucra el uso en forma cíclica de una fase orgánica que es inmisible con la fase acuosa de lixiviación. La fase orgánica actúa como medio de intercambio para efectuar la partición selectiva de un componente específico.

El proceso se lleva a cabo en dos pasos:

La primera etapa corresponde a la extracción, en esta etapa se pone en contacto una fase acuosa rica en metales con una fase orgánica con la capacidad de combinarse con el ion metálico de interés. El contacto se lleva a cabo por dispersión de una fase en la otra a la forma de pequeñas gotas, mediante agitación mecánica, seguida de la separación de estas por gravedad

La segunda etapa corresponde a la re-extracción donde la fase orgánica que contiene el ion metálico de interés se contacta con una fase acuosa, con el fin de transferir el ion metálico desde la fase orgánica a la nueva fase acuosa. Esta etapa es inversa a la primera por lo que se busca que el equilibrio de la ecuación (1) se desplace hacia el lado izquierdo. Esta etapa también sirve para regenerar el orgánico para su posterior reutilización en una nueva extracción. El siguiente esquema muestra la naturaleza cíclica de todas las etapas de proceso. (Ruiz,2013)



Figura 1: Recuperación de cobre mediante lixiviación- extracción por solventes- electrolisis. (Ruiz,2013)

2.1. Fase orgánica.

La fase orgánica generalmente es la combinación del extractante y el diluyente. En algunos casos puede consistir en un solo compuesto como fase orgánica, pero esto limita el control del sistema respecto a selectividad, capacidad de carga, solubilidad, velocidad de transferencia de masa, separación de fases y costos.

Los extractantes orgánicos utilizados en la extracción de cobre son compuestos químicos del grupo de las hidroxioximas, estos poseen la capacidad de extraer cobre y otros compuestos metálicos mediante el mecanismo de quelación. Este mecanismo se refiere a como el extractante fija químicamente el metal por dos lados, como si fuera realizado por tenazas.

2.1.1 Hidroxioximas utilizadas en la extracción de cobre

Las hidroxioximas más utilizadas industrialmente para la extracción de cobre son las aromáticas, las cuales poseen la siguiente estructura.

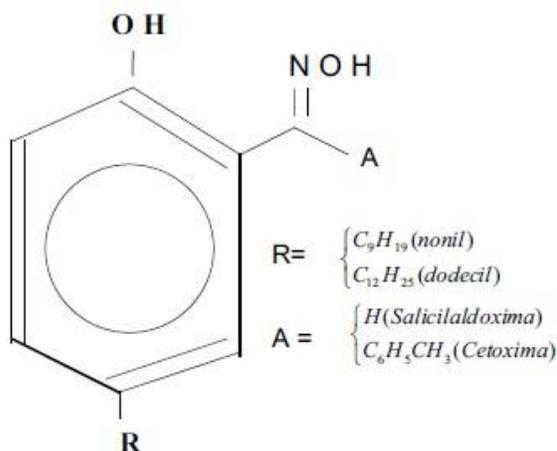


Figura 2: Estructura química general de las hidroxioximas aromáticas usadas comercialmente para la extracción de cobre. (Cognis, 2007)

Las salicilaldoximas son extractantes que se desarrollaron para extraer cobre desde soluciones más ácidas que las cetoximas. Su principal característica es la fuerza de extracción de cobre, pero también es su debilidad, ya que el cobre no se descarga satisfactoriamente con un electrolito de características normales, dando como resultado una transferencia neta de cobre más baja. Debido a lo anteriormente señalado es común que las aldoximas sean mezcladas con cetoximas o que se les agregue algún modificador de equilibrio con el objetivo de controlar la fuerza extractiva y así proporcionar una descarga óptima. A continuación, se presenta en la tabla 1 una comparación de cómo se ven afectadas algunas propiedades de los reactivos orgánicos al realizar mezclas de extractantes.

Tabla 1: Propiedades de las hidroxioximas aromáticas usadas comercialmente para la extracción de cobre. (Navarro, 2013)

Propiedad	Cetoxima	Aldoxima	Mezcla
Extracción	Moderada	Muy buena	Según composición
Re-extracción	Muy buena	Buena	Según composición
Selectividad Cu-Fe	Excelente	Excelente	Excelente
Cinética	Muy buena	Excelente	Muy buena
Separación de fases	Rápida	Rápida	Rápida
Estabilidad	Muy buena	Muy buena	Muy buena
Formación lodos	Lenta	Variable	Lenta

2.1.2 Diluyente:

Generalmente son hidrocarburos de baja solubilidad en la fase acuosa, su función principal es actuar como vehículo para el extractante y el complejo orgánico - metálico. Permite diluir reduciendo viscosidad y concentración con el fin de adaptarse a distintos tipos de soluciones acuosas.

Algunas propiedades y características que los disolventes comerciales deben cumplir son:

- Propiedades físicas adecuadas, en especial baja viscosidad y densidad.
- Estabilidad química.
- Baja volatilidad.
- Fácilmente accesible en grandes volúmenes a un bajo costo.
- No puede ser tóxico, cancerígeno o altamente inflamable.
- No debe promover la formación de terceras fases o emulsiones estables.

2.1.3 Modificadores

En general son reactivos solvatantes y alcoholes que al ser añadidos a la fase orgánica alteran algunas de sus propiedades físico- químicas. Como por ejemplo para disminuir la fuerza extractiva de alguna aldoxima.

Otros objetivos de agregar modificadores en la fase orgánica son:

- Aumentar la distribución de equilibrio.
- Aumentar la velocidad de extracción.
- Control de borra.
- Reducción de la degradación de extractante.

2.2 Fase acuosa:

La fase acuosa es de primordial importancia en la extracción por solventes. De su caracterización se sabe la concentración de metal de interés, concentración de otros metales, el pH de la solución, su potencial de oxidación y su temperatura.

Todos estos factores permiten determinar las condiciones y el extractante a utilizar. Más importante aún, cuando el proceso de extracción por solvente se aplica a elementos que en solución pueden tener más de un estado de oxidación.

Las principales impurezas de los PLS son Fe^{2+} , Fe^{3+} , As^{3+} , As^{5+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} , Al^{3+} , Cl^- , NO_3^- , SiO_2 y otras. Por otro lado, la elevada cantidad de sólidos en suspensión presente en las soluciones aumenta la formación de borras y aumenta el atrapamiento de orgánico.

2.2 Equipos utilizados en extracción por solventes.

La dispersión se realiza mediante agitación mecánica en un estanque mezclador. La posterior separación de fases se realiza generalmente por gravedad en un estanque decantador. El mezclador-decantador (mixer-settler) es el equipo más utilizado en la extracción por solvente de metales. Se presenta en la figura 3 un mezclador-decantador.

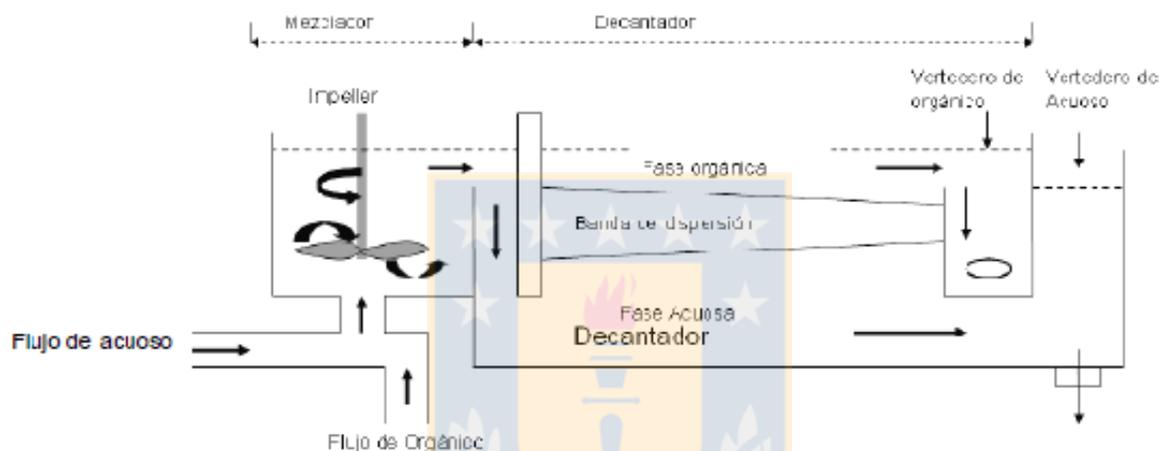


Figura 3: Equipo mezclador- decantador para SX. (Cognis,2007)

3. Caracterización del equilibrio en extracción por solventes

3.1 Isotermas de equilibrio:

Las isotermas o curvas de equilibrio presentan la concentración de la especie en la fase orgánica versus la concentración de esta en la fase acuosa en equilibrio a una temperatura dada. El método más utilizado para construir una isoterma es contactar distintas razones de acuoso y orgánico, para luego analizar la especie de interés una vez logrado el equilibrio.

Esto permite saber el grado de extracción (ideal) del metal que se puede lograr bajo distintas condiciones de operación.

En la figura 4 se muestran distintos tipos de isothermas. En el caso de las curvas tipo I, pertenecen a un extractante fuerte, en el caso de las curvas tipo II son extractantes más débiles y la curva III muestra una forma particular de S, esto se debe a que se puede encontrar una presencia importante de complejos no extraíbles o polimerización de la fase orgánica a bajas concentraciones del metal.

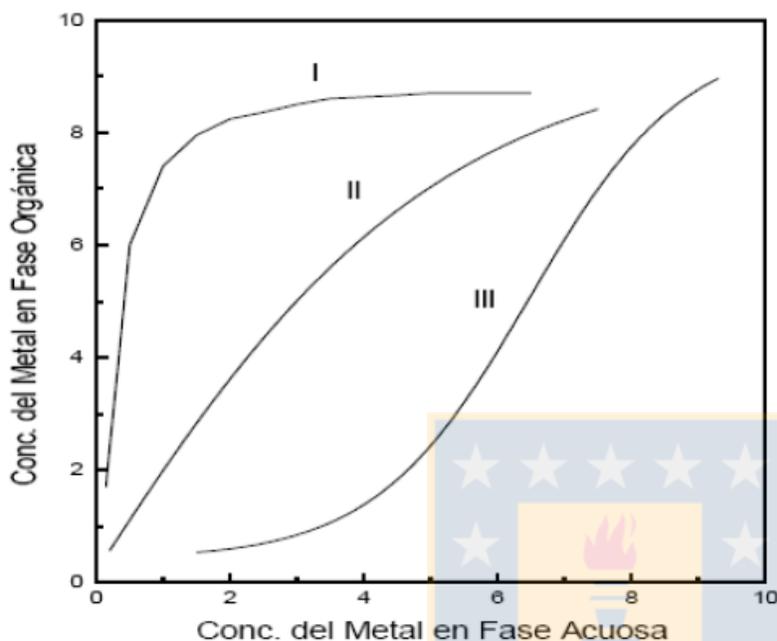


Figura 4: Tipos de isothermas. (Ruiz,2013)

3.2 Coeficiente de distribución

Corresponde a la razón de distribución de un metal entre la fase acuosa y la fase orgánica en el equilibrio, se conoce como coeficiente de extracción E o coeficiente de distribución D.

$$D = \frac{\text{Concentración del metal en la fase orgánica}}{\text{Concentración del metal fase acuosa}} \quad (2)$$

Mientras mayor sea el valor de D mejor es la extractabilidad del metal en el orgánico utilizado. Por otro lado, D es una constante que depende de muchos factores como la razón de fases utilizadas, concentración del extractante en la fase orgánica, pH y concentración inicial de metal en la fase acuosa. Si previamente estas condiciones no son especificadas el valor de D no tiene utilidad.

3.3 Influencia del pH en el coeficiente de distribución:

De la ecuación 1 se puede obtener la constante K de equilibrio y queda definida como:

$$K = \frac{[R_2Cu] \cdot [H^+]^2}{[RH]^2 \cdot [Cu^{+2}]} \quad (3)$$

Si no hay otras especies presentes en el sistema, el coeficiente de distribución estaría dado por:

$$D = \frac{[R_2Cu]}{[Cu^{+2}]} \quad (4)$$

Reemplazado en la ecuación 3, K queda definida como:

$$D = \frac{[RH]^2}{[H^+]^2} \cdot K \quad (5)$$

Aplicando logaritmos a la ecuación 5 se obtiene:

$$\log D = \log K + 2 \log[RH] + 2pH \quad (6)$$

En la ecuación 6 se aprecia la relación que existe entre el coeficiente de distribución y el pH de la solución, afectando directamente el grado de extracción

3.4 Selectividad:

Los licores provenientes de la etapa de lixiviación poseen más de una especie en solución. El poder selectivo de las hidroxioximas es bastante alto. Como se presenta en la figura 7 a pH 2 el cobre se puede cargar en una alta concentración y en forma selectiva pues el ion férrico es extraído de manera mínima. A pH más alto es capaz de extraer más cobre, pero con la desventaja de que pierde selectividad frente al Fe (III), el resto de los metales ahí mostrados solo pueden extraerse a pH mayor.

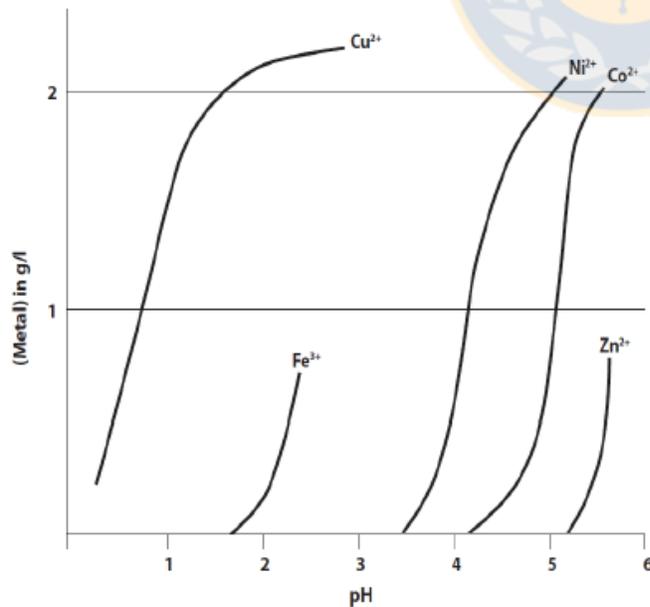


Figura 5: Isotermas de pH para lix 84. (Ruiz, 2013)

4. Antecedente sobre la separación de fases de una dispersión.

La separación de una dispersión líquido-líquido ocurre principalmente mediante dos mecanismos físicos. La sedimentación de gotas y coalescencia de estas. La sedimentación ocurre cuando una gota se mueve a través de la fase continua para aproximarse a su respectiva fase, coalescencia es el proceso de unir dos o más gotas para formar gotas más grandes o la adhesión de una gota con su interfase, estos dos procesos pueden ocurrir simultáneamente. La sedimentación y coalescencia dependen de un gran número de factores tales como: concentración de la fase dispersa, propiedades físicas, geometría del mezclador-sedimentador, turbulencia, entre otras. [8]

4.1 Formación de una dispersión y continuidad

Al realizar la mezcla de dos fases líquidas inmiscibles una mantiene su continuidad y la otra se dispersa formando pequeñas gotitas. La fase que se dividió se denomina fase dispersa, la que forma la matriz se llama fase continua.

Si la fase orgánica es la matriz, se habla de continuidad orgánica, en el caso contrario se habla de continuidad acuosa. La continuidad tiene mucha influencia en los arrastres físicos de una fase en la otra en una operación continua. Estos arrastres deben ser minimizados ya que, en el caso de arrastres de orgánico en el acuoso significaría pérdida de reactivo, puntualmente en el caso de los electrolitos puede producir contaminación en los cátodos. Por otra parte, si los arrastres son de acuoso en la fase orgánica, en la extracción se podrían traspasar impurezas al electrolito al momento de descargarlo, y en el caso que el arrastre de acuoso se genere en la descarga, al volver a extracción, el orgánico descargado podría producir un aumento en la acidez, disminuyendo la eficiencia del proceso. (Jeelani,1999)



Figura 6: Representación de la continuidad de una dispersión.

5. Revisión Bibliográfica

5.1 Investigaciones sobre Extracción por Solventes de Cobre con Hidroxioximas.

Alguacil et al. (2002) estudiaron la extracción de cobre desde soluciones de nitrato- ácido nítrico usando el reactivo Acorga M5640, el cual contiene 5-nonilsalicilaldoxima modificada. Dentro del estudio se examinó la tasa de extracción, el efecto del pH acuoso y también concentraciones de extractantes.

La tasa de extracción se evaluó utilizando soluciones acuosas que contenían 1g/L de Cu a diferentes concentraciones de ácido nítrico y con orgánico Acorga M5640 a 10% (v/v). El equilibrio de extracción se alcanzó cercano a los 10 minutos de contacto sin lograrse mejoras con la variación de concentración de ácido nítrico.

El efecto de la temperatura resultó en que un incremento de ella trae un incremento en la extracción de cobre. Demostrando que es una reacción de extracción ligeramente endotérmica. Para esto se utilizó una fase acuosa con 3.5g/L de Cu y 0.1M HNO₃ y una fase orgánica 5% (v/v).

Para determinar la influencia del pH se utilizó una solución acuosa de 0.1g/L de Cu y diferentes fases de Acorga M5640 (0.5, 1 y 2.5 %v/v). Se obtuvo una evidente dependencia del pH en la extracción de cobre, incluso cuando las concentraciones de extractante fueron bajas. La casi total extracción de cobre fue a un pH= 1 de la solución acuosa.

Las isotermas de extracción obtenidas mostraron que la concentración de ácido en la solución acuosa cargada influencia claramente la forma de la isoterma y la carga de la fase orgánica. Por lo que el aumento de acidez en la solución acuosa conducirá al uso de soluciones Acorga M5640 más concentradas para obtener mejores cargas de cobre en la fase orgánica.

Dentro del análisis de la descarga de cobre se obtuvo que el contacto de Acorga M5640 con ácido nítrico degrada la sustancia activa del extractante, por lo que se sugirió la idea de la utilización de ácido sulfúrico ya que no es un agente oxidante. Se obtuvieron las isotermas contactando distintas razones O/A, una fase orgánica 40% (v/v) cargada con 22g/L de Cu con una solución acuosa de ácido sulfúrico de 180g/L durante 10 minutos

Chmielewski et al. (2012) realizaron una investigación donde compararon el comportamiento en la extracción de cobre utilizando tres extractantes que se encuentran en el mercado, LIX 984N, LIX 612N-LV y ACORGA M5640 diluidos cada uno en Escaid 100, generando así una fase orgánica con 30%v/v de cada extractante.

De los resultados que se obtuvieron del estudio, el extractante LIX 612N-LV mostró un mejor desempeño por sobre LIX 984N, donde ambos reactivos extrajeron alrededor del 86% del cobre presente en una fase acuosa de alimentación que contenía 35.2g/L de Cu^{2+} , 28.4g/L de Fe total, 1.67g/L de Zn, 95.0mg/L de Co y 21.5mg/L de Ni a un $\text{pH}=2.2$ y utilizaron una razón O/A=4 a una temperatura de 25°C. La concentración de cobre en el refino fue de 5.5 y 5.2 g/L para LIX 984N y LIX 612N-LV para 2 etapas de extracción según el diagrama de McCabe-Thiele que construyeron. Además, la fase orgánica que contiene la aldoxima tiene una mejor capacidad de extracción lo que la hace más ventajosa por sobre la mezcla aldoxima/cetoxima. Solo se observó una pequeña diferencia entre las transferencias neta de cobre para estos dos solventes orgánicos, donde a medida que se aumenta la razón O/A decrece la capacidad de carga de cobre. El mejor desempeño de LIX 612N-LV está relacionado al agente modificador que baja la viscosidad de la fase orgánica, garantizando una mejor eficiencia de extracción y descarga comparándola con otros agentes extractantes.

Debido a que el agente LIX 612N-LV mostró mejores resultados que LIX 984N, decidieron comparar el desempeño con otro extractante de una estructura similar, el ACORGA M5640, utilizando una fase acuosa de 26.0g/L de Cu^{2+} , 23.8g/L de Fe total, 2.04g/L de Zn, 29.0mg/L de Co y 26.3mg/L de Ni a $\text{pH}=2.2$ y a 25°C, dando como resultado que el extractante desarrollado por COGNIS removió cerca del 88% del cobre disuelto en el PLS, mientras que el extractante CYTEC removió el 92% del cobre total aproximadamente. La concentración de cobre del refino fue de 3g/L y 2g/L para LIX 612N-LV y ACORGA M5640 respectivamente. Ambas fases investigadas tienen una capacidad similar de cargar aproximadamente 17g/L de cobre.

Ahora, al comparar la transferencia neta entre los extractantes, ACORGA M5640 mostró una leve ventaja sobre LIX 612N-LV. Como se mencionó antes, se observó una disminución en la transferencia neta de cobre a medida que la razón O/A aumentaba.

Ruiz et al. (2018) realizaron un estudio sobre el efecto de iones cloruros en la extracción de cobre utilizando Acorga M5910 y LIX 984N. Este trabajo abarcó tópicos de vital interés para el desarrollo de nuestro estudio. En primer caso elaboraron isotermas de extracción para distintas concentraciones de cloruro de 0, 60 y 110 g/L en la fase acuosa, con una fase orgánica al 26% v/v para ambos extractantes. De las isotermas obtenidas se pudo concluir que la presencia de cloruro en la solución acuosa afecta negativamente el equilibrio de extracción, esto se demuestra en un desplazamiento hacia el lado derecho de las isotermas en presencia de cloruros.

Si bien afectó negativamente a ambos extractantes, en Acorga M5910 el efecto negativo fue menor. Esto puede ser explicado por el contenido de ketoxima en el Extractante LIX 984N, la cual ha mostrado ser más sensible a la presencia de cloruros que la nonilsalicilaldoxima.

Por otro lado, se obtuvo que un aumento en la temperatura de 25 a 35 °C tuvo un leve efecto positivo en el equilibrio de extracción para ambos extractantes.

La re-extracción para cada extractante tuvo distintas condiciones de descarga. El extractante LIX 984N al 26 %v/v fue cargado a 9,6 g/L de Cu mientras que el extractante Acorga M5910 al 26% v/v fue cargado a 11,8 g/L de Cu. Ambos orgánicos fueron contactados con un electrolito sintético con 35 g/L de Cu y dos concentraciones de ácido sulfúrico, 180 y 190 respectivamente donde se obtuvo que una concentración más alta de ácido sulfúrico en el electrolito mejora la descarga de cobre en la fase orgánica. También se pudo concluir que un aumento de la temperatura de 25 a 35°C afecta negativamente el equilibrio de descarga para ambos extractantes.

6. Desarrollo experimental

6.1 Reactivos

Fases acuosas:

En la preparación de las fases acuosas se utilizaron los siguientes reactivos:

- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.
- $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.
- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.
- NaCl .
- Agua de mar.

La fase acuosa utilizada en la determinación de las isotermas de extracción se preparó con 6 g/L de Cu^{2+} , 5 g/L de Fe^{2+} y 2 g/L de Fe^{3+} (todos agregados como sulfatos), además de agua de mar con tres concentraciones totales de cloruro 19.6, 60 y 110 g/L respectivamente a pH 2.0 el cual fue regulado con ácido sulfúrico. Para poder generar una comparación se utilizó una solución de agua destilada con 0 g/L de cloruro.

La composición de la fase acuosa utilizada en re-extracción (electrolito spent) fue de 35 g/L de Cu y ácido sulfúrico a concentraciones de 180, 190 y 200 g/L.

El agua de mar utilizada fue proporcionada por la facultad de oceanografía de la Universidad de Concepción, su caracterización se presenta en la tabla 2 a continuación:

Tabla 2: Composición del agua de mar

Especie	Concentración
Na	4658 mg/L
K	400.1 mg/L
Mg	939.3 mg/L
Ca	593.0 mg/L
Cl^-	19570 mg/L
SO_4^{2-}	2629 mg/L
HCO_3^-	142.5 mg/L
Cu	40.73 $\mu\text{g/L}$

Fase orgánica:

En la preparación de la fase orgánica se utilizó el extractante Acorga M5910 de la empresa Solvay S.A y diluyente Escaid 110.

La fase orgánica utilizada en las pruebas de extracción tenía una concentración de 26% v/v de extractante con diluyente Escaid 110 y no contenía cobre inicialmente. En el caso de las pruebas de re-extracción la composición del orgánico fue 26% v/v de Acorga M5910 en Escaid 110 cargado a 9.6 g/L de Cu.

6.2 Equipamiento

6.2.1 Pruebas de equilibrio de extracción y re-extracción.

El equipo que se utilizó en las pruebas de equilibrio fue en un vaso precipitado de capacidad 1L y 10 cm de diámetro, con 4 deflectores para impedir la formación de un vórtice al momento de agitar las soluciones. El reactor se mantenía dentro de un baño termostático a la temperatura requerida. La agitación se llevó a cabo mediante un impulsor de vidrio de 4 aspás ubicado a aproximadamente 3 centímetros sobre el nivel de la base del vaso.



Figura 7: Equipamiento de las pruebas de extracción. 1: baño termostático, 2: reactor, 3: impulsor de vidrio de 4 aspás, 4: agitador mecánico.

6.2.2 Pruebas de separación de fases.

Como reactor se usó un vaso de doble pared en donde circuló agua proveniente de un baño termostático a la temperatura requerida. El proceso de separación de fases se grabó mediante una cámara conectada a un computador y el posterior análisis de datos se realizó con el software LabView.



Figura 8: Sistema para medir la separación de fases. 1: Computador con software LabView, 2: Cámara para medir la separación de fases, 3: Baño termostático, 4: Vaso de doble pared con deflectores, 5: Agitador mecánico, 6: Impulsor de teflón.

6.2.3 Pruebas de caracterización del orgánico y acuoso.

Para las pruebas de caracterización se utilizaron los equipos presentados en las figuras 19-21.



Figura 9:Densímetro Mettler Toledo DA-100M.



Figura 10:Tensiómetro Kruss.



Figura 11: Viscosímetro Cannon-Fenske

7 Metodología Experimental

7.1 Pruebas de equilibrio de extracción

Para determinar isotermas de extracción se hicieron pruebas de equilibrio utilizando varias razones orgánico/acuoso para las distintas concentraciones de Cl. Los volúmenes de acuoso y de orgánico se midieron usando matraces aforados y/o pipetas totales a 20°C y se detallan en la Tabla 3. Las fases se introdujeron en el reactor previamente temperado por el baño termostático. Se esperó unos minutos hasta alcanzar la temperatura deseada correspondientes a 25°C y 35°C, para luego agitar la mezcla durante 12 minutos a 600 rpm y para finalizar con otros 3 minutos a 300 rpm con el propósito de lograr un mayor tamaño en las gotas del orgánico y evitar arrastres en la fase acuosa.

Una vez terminada la agitación se esperaron unos minutos para una correcta separación de fases. Luego se tomó una muestra de orgánico, la cual fue descargada con una solución de ácido sulfúrico a una concentración de 180 g/L para poder ser analizada. Por otro lado, también se extrajo una muestra del acuoso, la cual se filtró, se le midió pH y se envasó para enviar a análisis químico.

Tabla 3: Volúmenes de fases acuosa y orgánica usadas en las pruebas de equilibrio de extracción.

Razón O/A	O [mL]	A [mL]
5/1	500	100
3/1	450	150
2/1	360	180
1/1	300	300
1/2	180	360
1/4	120	480
1/6	85	510

7.2 Pruebas de equilibrio de re-extracción.

Para determinar las isotermas de re-extracción se cargó el orgánico con una solución acuosa sin cloruro, con el fin de obtener una fase orgánica cargada aproximadamente al 80% de su carga máxima. Para lograr esa concentración de Cu en el orgánico, se contactó a una razón O/A 1:2, la cual se determinó de la isoterma de extracción experimental. Se realizaron múltiples contactos de cargado para obtener un volumen suficiente para completar todas las pruebas de re-extracción a las temperaturas de interés (25 y 35 °C). Además, se tomaron muestras cabeza del orgánico cargado para obtener el valor de carga real y del electrolito spent a concentraciones de ácido sulfúrico, 180, 190 y 200 g/L.

Las pruebas de re-extracción se realizaron mezclando el orgánico cargado con el electrolito a las razones O/A mostradas en la tabla 4.

Tabla 4: Volúmenes de fases acuosa y orgánica para pruebas de equilibrio de re-extracción.

Razón O/A	O [mL]	A [mL]
3/1	450	150
2/1	400	200
1/1	300	300
1/2	200	400

7.3 Pruebas de separación de fases

La separación de fases

El objetivo de estas pruebas fue determinar el tiempo necesario para la separación completa de las fases, las pruebas fueron realizadas bajo las variables presentadas en la tabla 5. Para cada una de las experiencias se equilibró previamente el orgánico con una solución acuosa de idéntica concentración de cloruro a la prueba de extracción correspondiente, a una razón O/A 1:1 (350 mL de cada fase). Una vez alcanzado el equilibrio, se procedió a contactar las fases por 20 minutos. Una vez terminada la agitación, la separación de fases fue grabada mediante una cámara conectada a un computador con el fin de procesar las imágenes y obtener las alturas de la fase acuosa a distintos tiempos procesando las imágenes en el programa Labview.

Tabla 5: Variables operacionales

Parámetro	Rango	Unidad
Velocidad de agitación	800	rpm
Tiempo de Agitación	1200	s
Tipo de extractante	Acorga M5910	-
Concentración de Extractante	26	% v/v
Continuidad de fases	Orgánica	-
pH	2	-
Concentración de cobre	6	g/L
Temperatura	25 ,35	°C

7.4. Caracterización de soluciones.

Para lograr un estudio más detallado de como se ve afectada la separación de fases, se determinaron los valores de las propiedades físicas de las soluciones acuosas y orgánicas. Dentro de ellas se analizó densidad, viscosidades, tensión superficial e interfacial. Los equipos utilizados fueron presentados anteriormente.

7.5. Lavado del orgánico

Estas pruebas se realizaron para determinar la cantidad de cloruro cargada en la fase orgánica. Para las pruebas de lavado se usaron cuatro muestras de orgánicos cargados, obtenidos en contactos con el acuoso de composición estándar de las pruebas de extracción, mezclados en razones O:A de 1:1 y 1:2, para acuosos con contenidos de 60 y 110 g/L de Cl^- . La solución acuosa de lavado utilizada se ajustó a un pH aproximadamente de 0,8 con ácido sulfúrico. El procedimiento de lavado implicó mezclar por 15 min 100 ml del orgánico cargado con 10 ml de la solución de lavado en un embudo de decantación. Una vez transcurrido el tiempo de mezclado (5 min) las fases se dejaron separar y se vació el acuoso por la llave inferior en un matraz aforado de 25 ml. Se repitió el proceso con solución fresca de lavado y se juntó en el matraz. Posteriormente, se enrasó el matraz a 25 ml y la solución se envió a análisis químico por cloruro.

8. Resultados y discusiones.

8.1 Isotermas de extracción

La primera etapa de la investigación consistió en estudiar cómo es influenciada la extracción de cobre bajo las condiciones operacionales antes proporcionadas

8.1.1 Efecto de la temperatura

A continuación, las figuras 12-15 presentan las isotermas obtenidas usando Acorga M5910 al 26% en ESCAID 110 con soluciones acuosas con distinto contenido de cloruro a 25 y 35 °C.

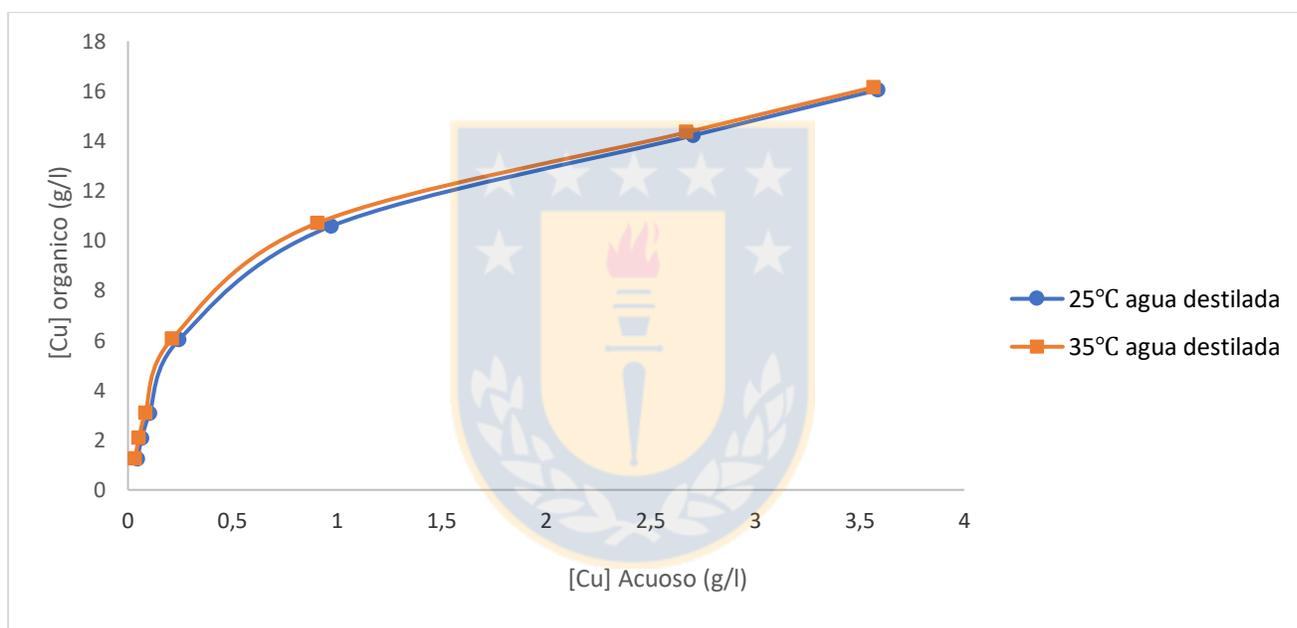


Figura 12: Isotermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con agua destilada 0 g/L de Cl⁻ total a 25 y 35 °C.

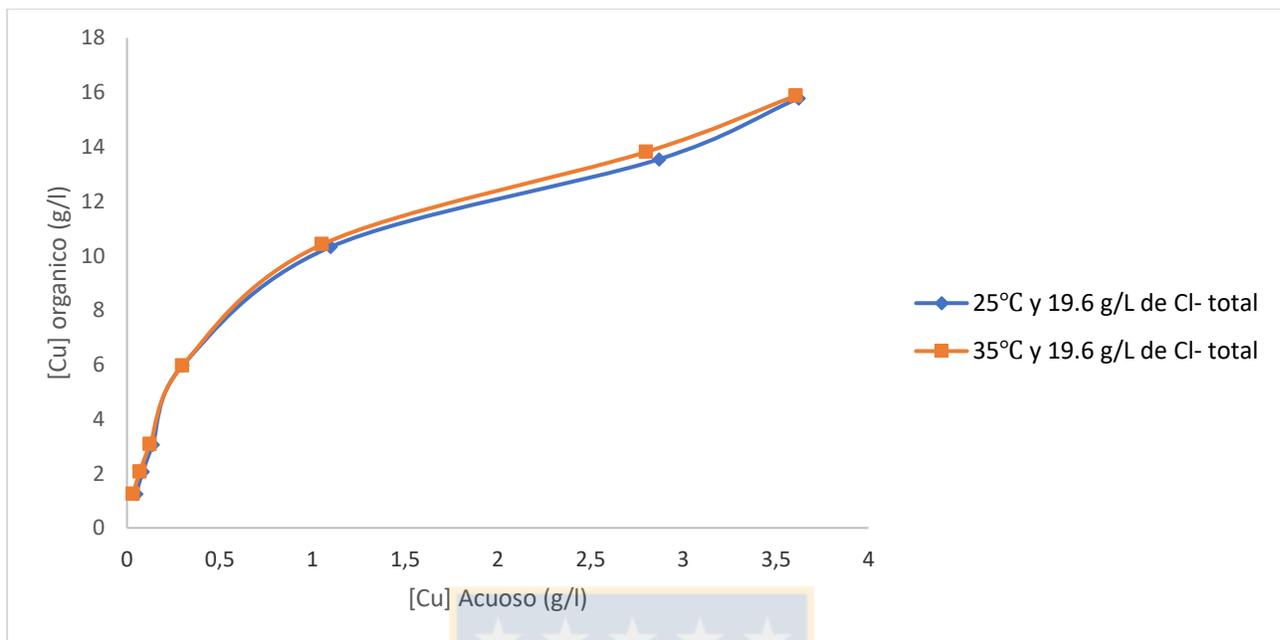


Figura 13: Isothermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con agua de mar con 19.6 g/L Cl⁻ total a 25 y 35°C.

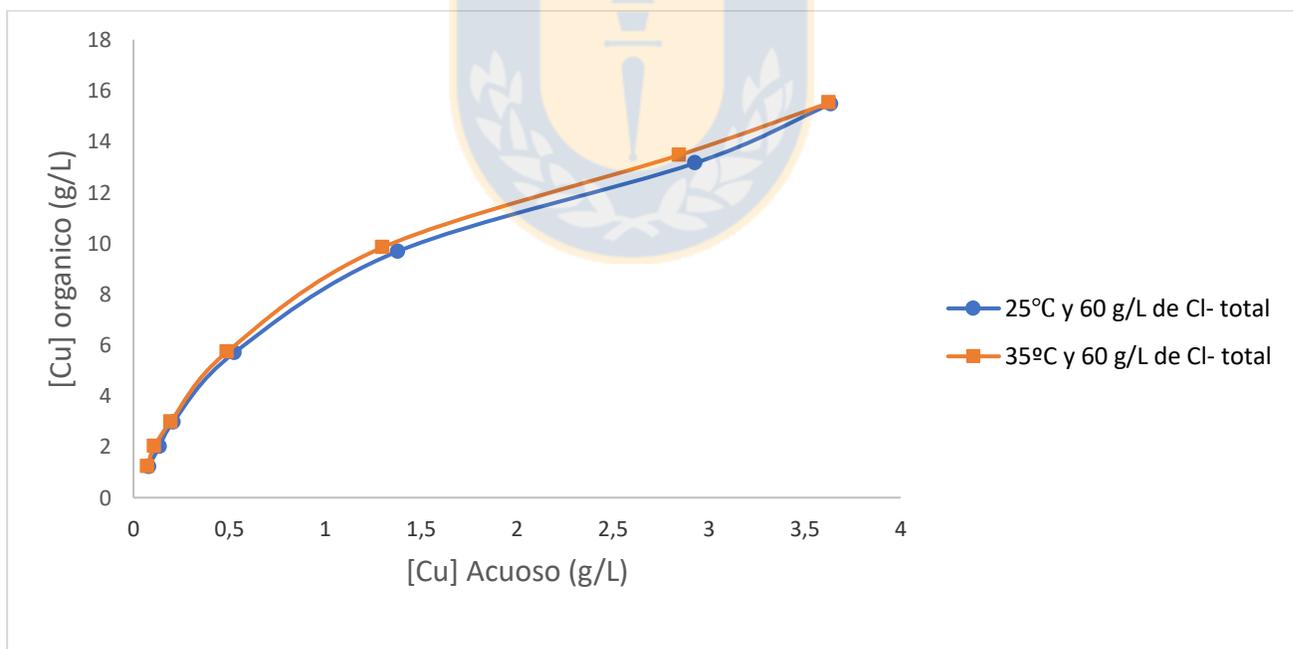


Figura 14: Isothermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con agua de mar con 60 g/L de Cl⁻ total a 25 y 35 °C.

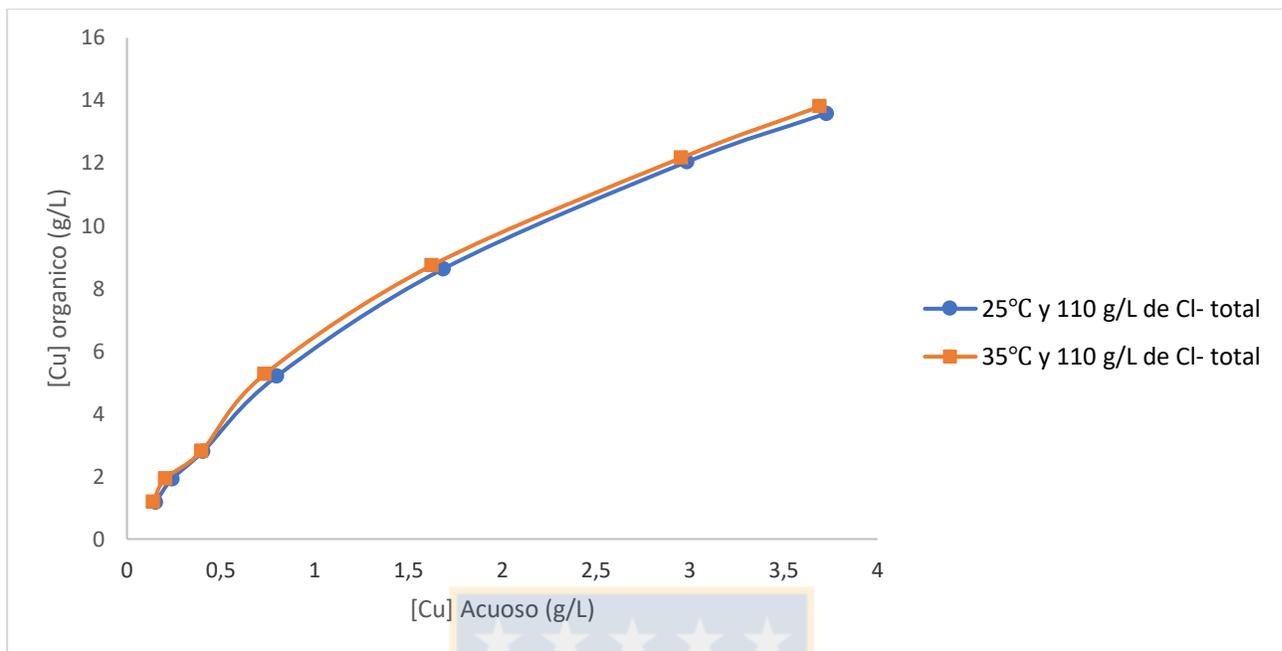


Figura 15: Isotermas de extracción para Acorga M5910 al 26% v/v y fase acuosa con 110g/L de cloruro total a 25 y 35 °C con agua de mar.

En todas las figuras presentadas se aprecia que las isotermas de extracción a 25°C se encuentran por debajo de las isotermas de extracción a 35°C, esto nos permite inferir que el efecto de la temperatura afecta positivamente la extracción, independiente de las concentraciones de Cl⁻. Para dimensionar el efecto se tomó como referencia la razón O/A 1:1 de la isoterma con agua de mar con 60 g/L de Cl⁻ total, donde se obtuvo que a 25°C el porcentaje de extracción fue de un 91.56%, mientras que a 35°C bajo las mismas condiciones antes mencionadas se obtuvo 92.15%. El efecto si bien es positivo, afecta levemente la extracción.

8.1.2 Efecto de la concentración de cloruro.

La influencia de las concentraciones de cloruro en la extracción de cobre utilizando Acorga M5910 se presenta en las figuras 26 y 27.

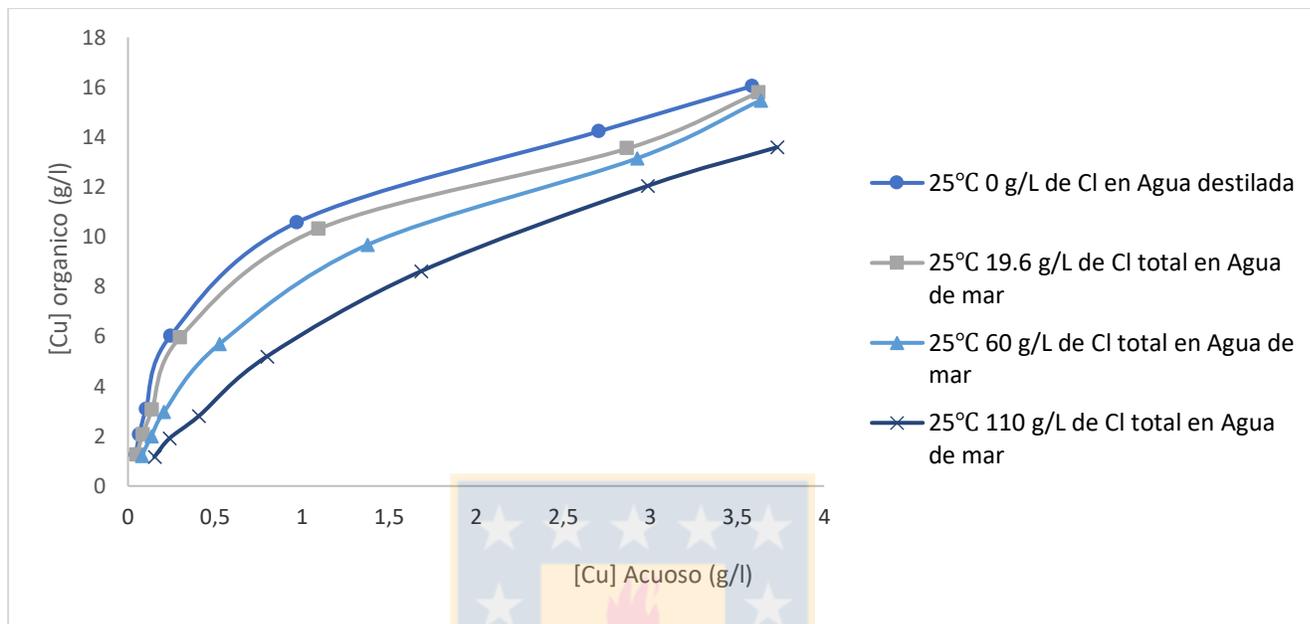


Figura 16: Isotermas de extracción de cobre con Acorga M5910 26%v/v a 25°C, para soluciones acuosas con distintas concentraciones de cloruro.

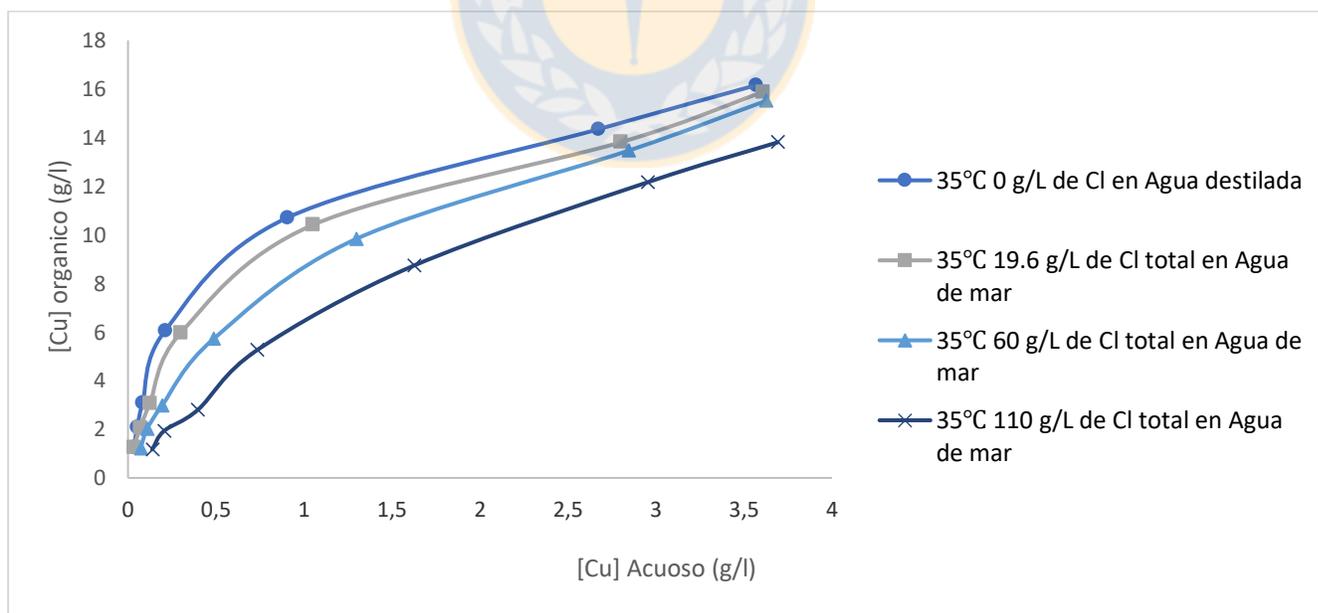


Figura 17: Isotermas de extracción de cobre con Acorga M5910 26%v/v a 35°C, para soluciones acuosas con distintas concentraciones de cloruro.

En las figuras se observa que a medida que se aumenta la concentración de cloruro en la fase acuosa, la fase orgánica extrae menor cantidad de cobre. Si tomamos nuevamente la razón O/A 1:1 para analizar cómo evoluciona la extracción de cobre, se tiene que la isoterma con agua destilada con 0 g/L de Cl^- total a 25°C extrae un 96.11%, mientras que la isoterma con 110 g/L de Cl^- total en agua de mar extrae un 86.69%. La diferencia es de aproximadamente un 10%, una cifra bastante significativa que corrobora lo antes mencionado. Por lo que a medida que se aumenta la concentración de cloro el extractante pierde su capacidad de extracción.

Con el propósito de comprender la disminución de extracción de cobre, es importante mencionar que al existir presencia de cloruros en la solución acuosa puede ocurrir la formación de clorocomplejos de la forma $\text{CuCl}_j^{(2-j)}$ con $j=0-4$, los cuales disminuyen el porcentaje del ion Cu^{2+} dando paso a la formación de CuCl_2 y de CuCl^+ , los que predominan en la fase acuosa existiendo la posibilidad de co-extraer estos complejos por parte del extractante.

8.1.3 Acidez en las soluciones en el equilibrio.

Las soluciones acuosas preparadas se ajustaron a un pH de 2. En la mayoría de los casos se tuvo agregar una pequeña cantidad de ácido sulfúrico para lograr dicho ajuste ya que las soluciones tendían a tener un pH levemente superior a 2 a excepción de la solución con mayor concentración de cloruro la cual presentaba un pH de aproximadamente 1.8, lo cual se solucionó con agregar gotas de hidróxido de sodio.

Se realizó un análisis del pH en las soluciones acuosas luego del contacto con el fin de observar su comportamiento y buscar una explicación de la disminución de extracción de cobre.

Los valores obtenidos de pH post contacto en las soluciones acuosas de las isotermas de extracción se adjuntan en anexos en las tablas 27 y 28 respectivamente.

Después de cada contacto el pH de las soluciones disminuyó debido a que la reacción de extracción presentada en la ecuación 1 obtiene como producto la liberación de protones a solución.

En el caso de las isotermas de extracción a 35°C , donde se obtuvo porcentajes mayores de extracción en comparación a las de 25°C , los pH obtenidos post contacto son más ácidos ya que al producirse una mayor extracción de cobre existe una mayor liberación de protones.

Algo contrario a lo mencionado sucede en las isotermas de mayor concentración de Cl^- ya que los pH post contacto son menores.

Esto se podría interpretar de manera que la extracción de cobre fue mayor ya que existe una mayor cantidad de protones en solución, pero la situación es contraria a lo determinado experimentalmente, ya que la extracción decae a medida que aumenta la concentración de Cl^- como se ve representado en las figuras 18 y 19. Entonces se pudo inferir que la influencia del ion cloruro en la pérdida de capacidad de extracción, no es solo debido a la disminución de disponibilidad de Cu^{2+} , sino también por un aumento en la actividad de los protones que pudiera generarse por parte del Cl^- , lo cual cambiaría la concentración efectiva, lo que bajaría el pH durante la reacción perjudicando una mayor extracción de cobre.

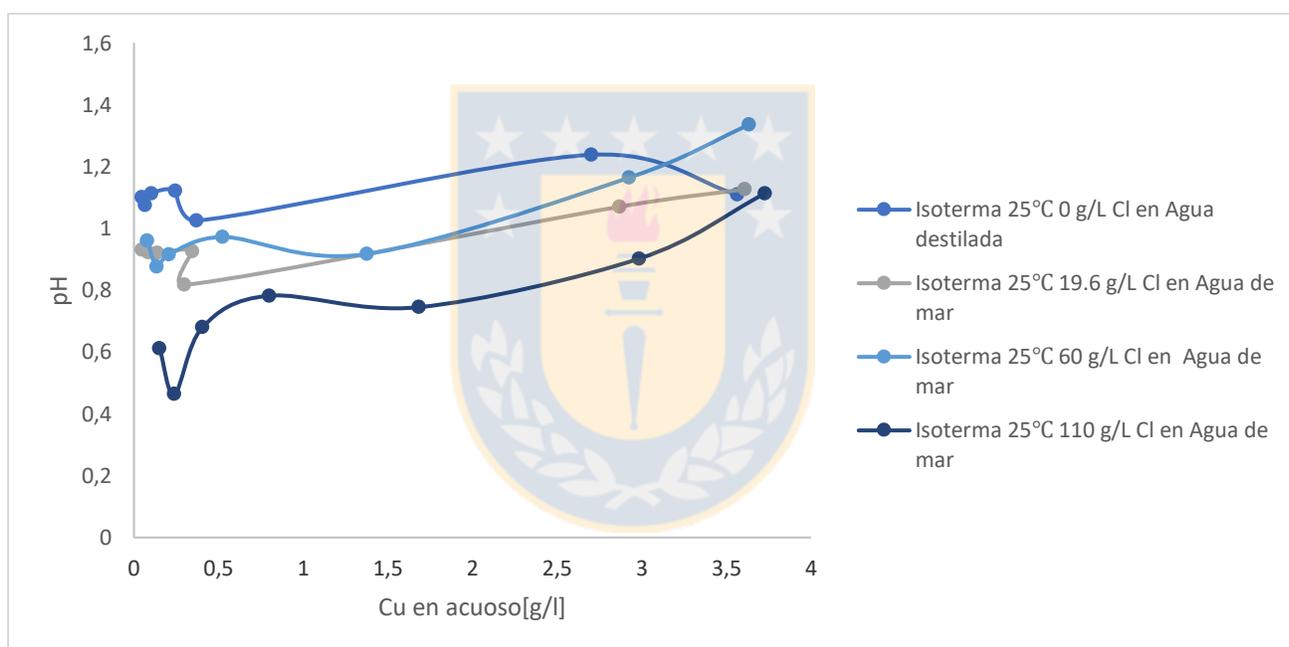


Figura 18: pH vs concentración de cobre de la solución acuosa después del contacto a 25°C en las pruebas de equilibrio de extracción.

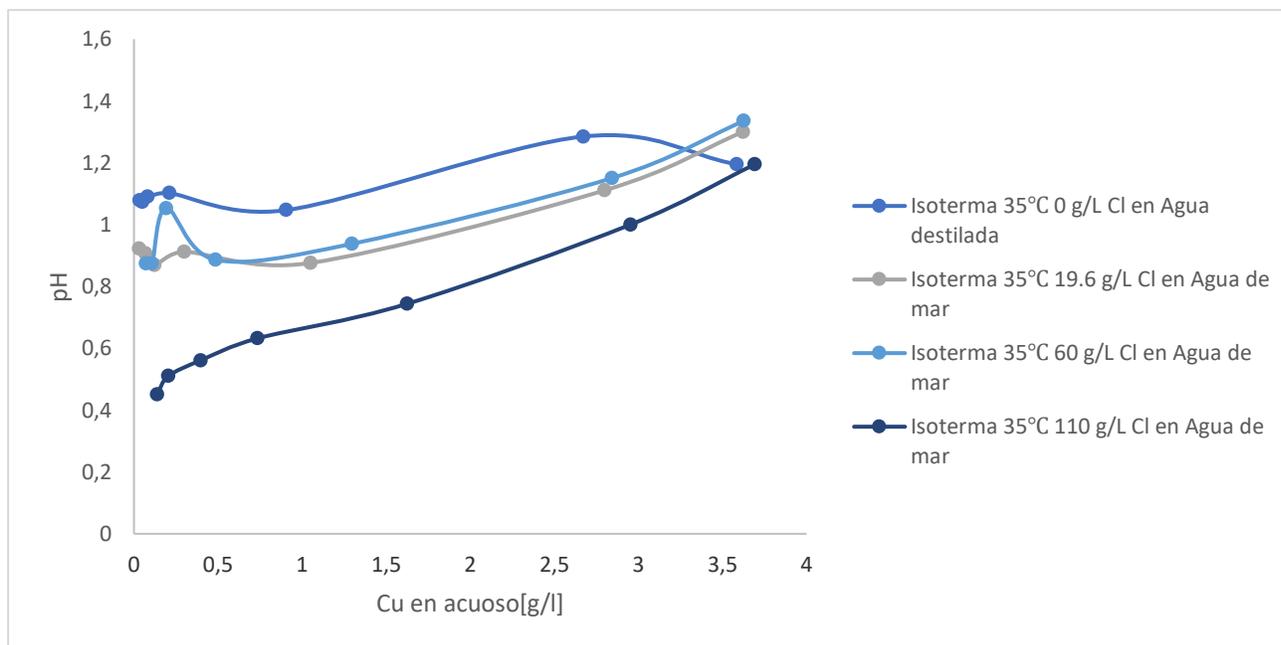


Figura 19:pH vs concentración de cobre de la solución acuosa después del contacto a 35°C en las pruebas de equilibrio de extracción.

8.1.4 Selectividad Cu-Fe

Como resultado de la determinación de isotermas de extracción, se pudo evaluar la selectividad de hierro del reactivo orgánico utilizado en comparación a la extracción de cobre. Para ello se seleccionó 3 puntos de la isoterma de extracción, a las razones O/A 1:1,1:4 y 1:6. El orgánico cargado de estos puntos fue descargado con una solución de ácido sulfúrico a 180 g/L. A continuación, se adjunta en la tabla 6 los resultados obtenidos para una fase acuosa con agua de mar a 60 g/L de Cl⁻ total a 25 y 35 °C.

Tabla 6:Extracción de Fe y Cu para una fase acuosa 60 g/L de Cl⁻ total a 25 y 35 °C.

Razón	Fe [ppm]	Cu [ppm]	Temperatura °C
1/1	2,70	1050	25
1/4	0,43	2289	25
1/6	0,82	2685	25
1/1	2,78	1089	35
1/4	0,94	2463	35
1/6	1,35	2710	35

De la tabla se aprecia que la selectividad Cu/Fe del reactivo es alta. Tomando la razón 1:1 a 25°C para poder realizar una comparación, tenemos que el reactivo orgánico logra cargar una cantidad de 2,70 ppm de Fe, mientras que de Cu se cargaron 1050 ppm.

8.2 Isotermas Re-extracción

Para determinar las isotermas de re-extracción se tuvo que cargar el orgánico, la carga fue de 9.60 g/L de cobre. La razón de fases a utilizar para su carga fue determinada de las isotermas de extracción como se mencionó en la sección 7.3. Se consideraron cuatro razones O/A para la elaboración de las isotermas, dos temperaturas de operación y 3 concentraciones de ácido sulfúrico para su descarga. A continuación, en las figuras 20-22 se presentan los resultados obtenidos.

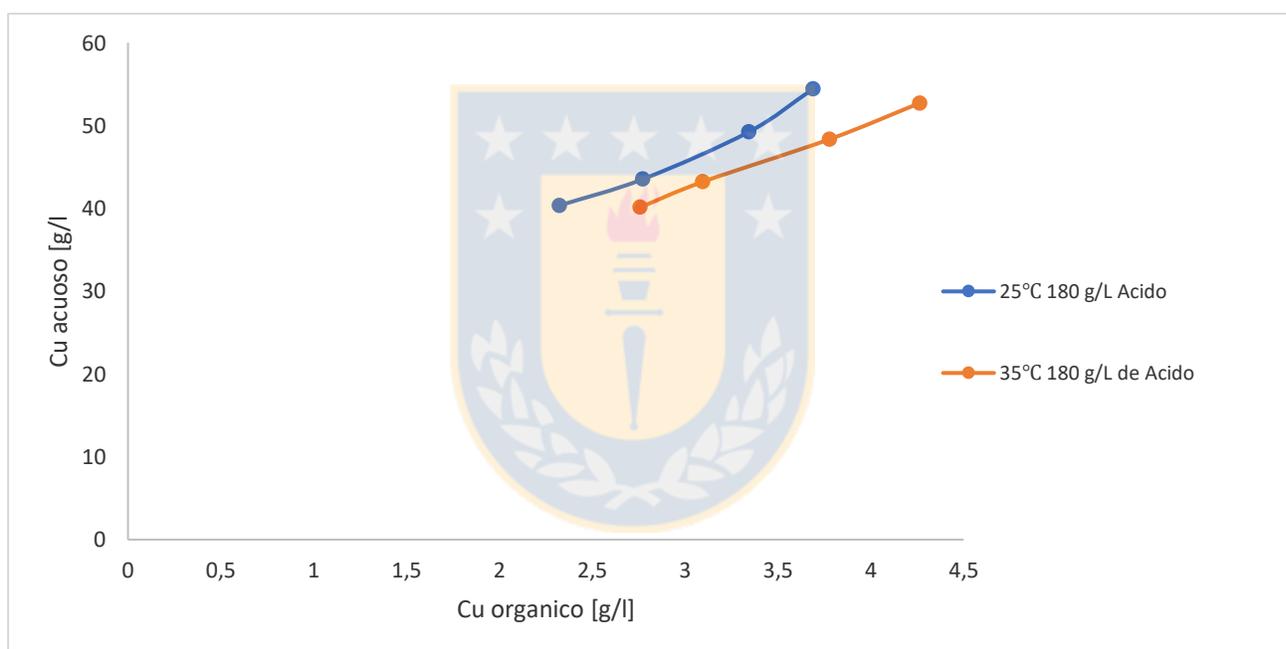


Figura 20: Isotermas de re-extracción del Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 180 g/L.

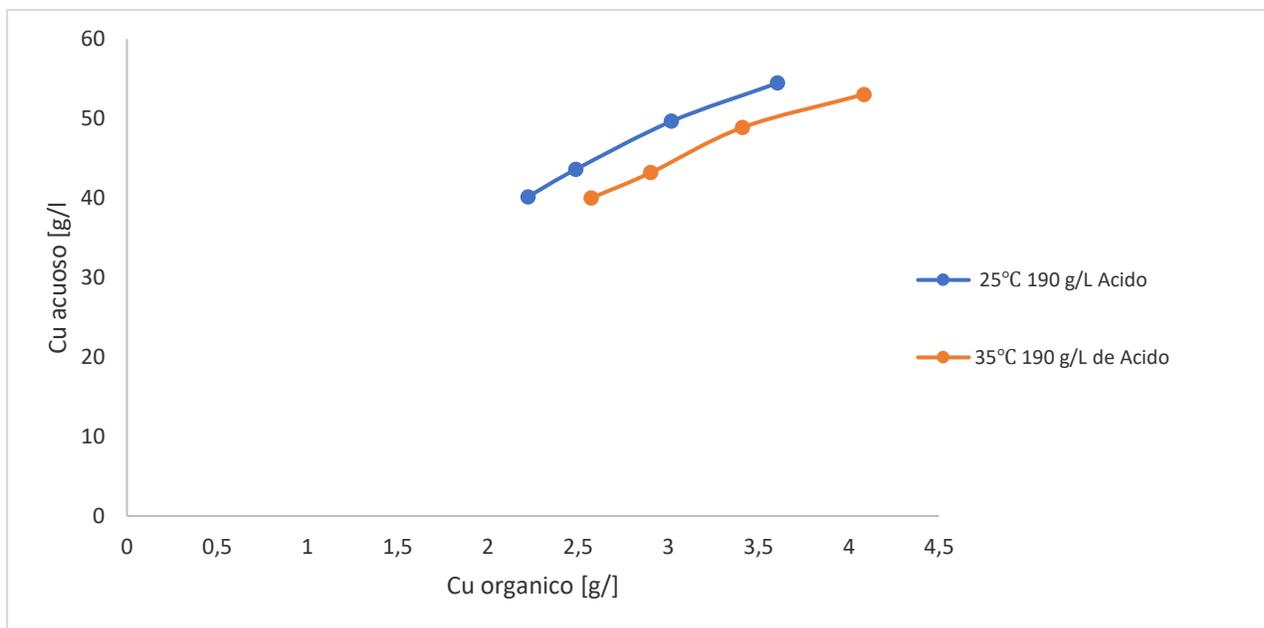


Figura 21: Isothermas de re-extracción del Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 190 g/L.

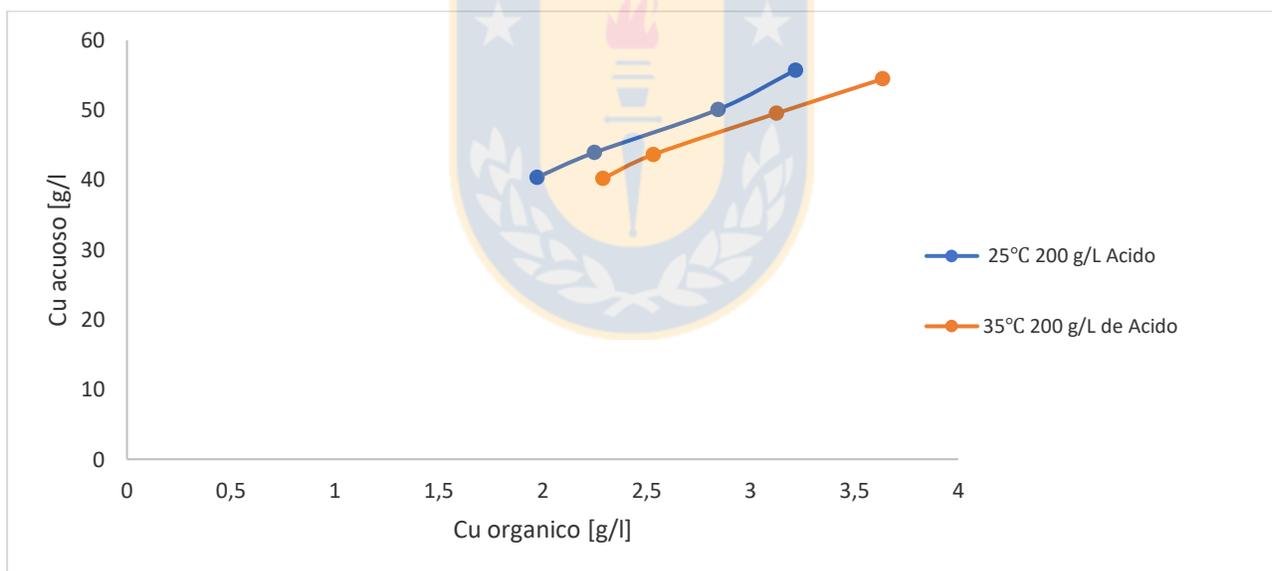


Figura 22: Isothermas de re-extracción del Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 200 g/L.

En todos los casos las isothermas de re-extracción a menor temperatura están sobre las isothermas de mayor temperatura, lo que demuestra que la re-extracción se ve favorecida mientras se opere con una temperatura menor. Esto era esperable ya que el equilibrio en las isothermas de extracción se ve favorecido a mayor temperatura y en este caso el desplazamiento del equilibrio es contrario, por lo que una reducción en la temperatura favorecería la descarga del orgánico cargado.

Otro factor importante en la etapa de descarga son las concentraciones de ácido a las que se trabajó (180,190 y 200 g/L de ácido sulfúrico) las cuales tuvieron una incidencia no menos importante, ya que al aumentar la concentración de ácido en electrolito spent, la descarga del orgánico cargado se vio favorecida. A continuación, en la figura 23 y 24 se presenta todas las situaciones antes mencionadas.

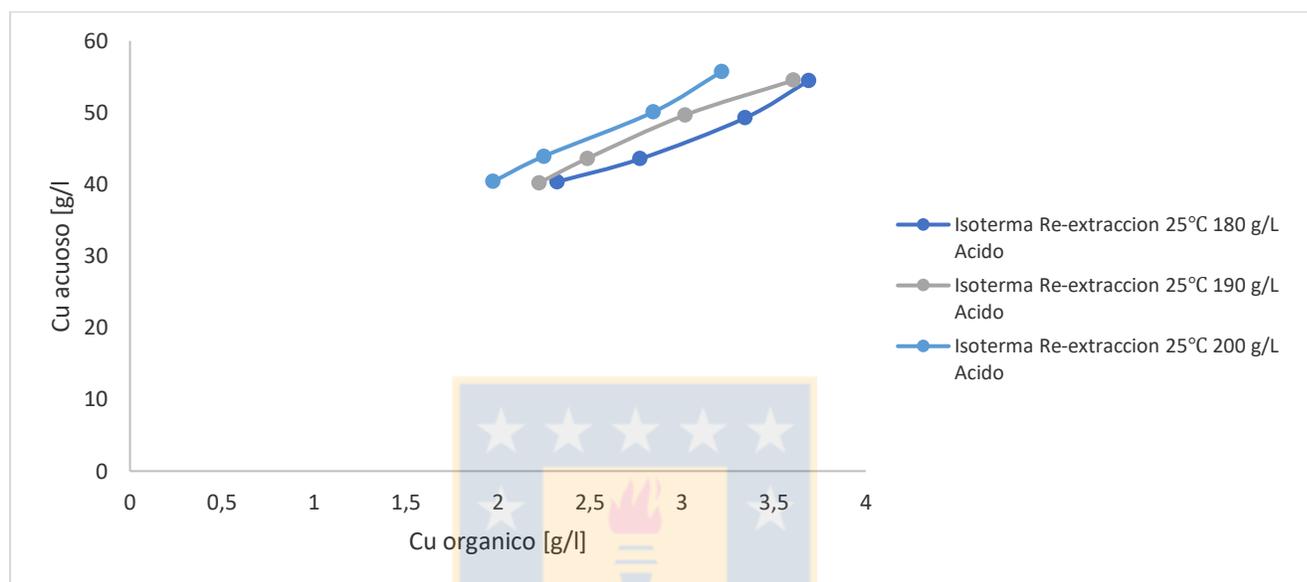


Figura 23: Isothermas de re-extracción a 25°C para Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 180,190 y 200 g/L.

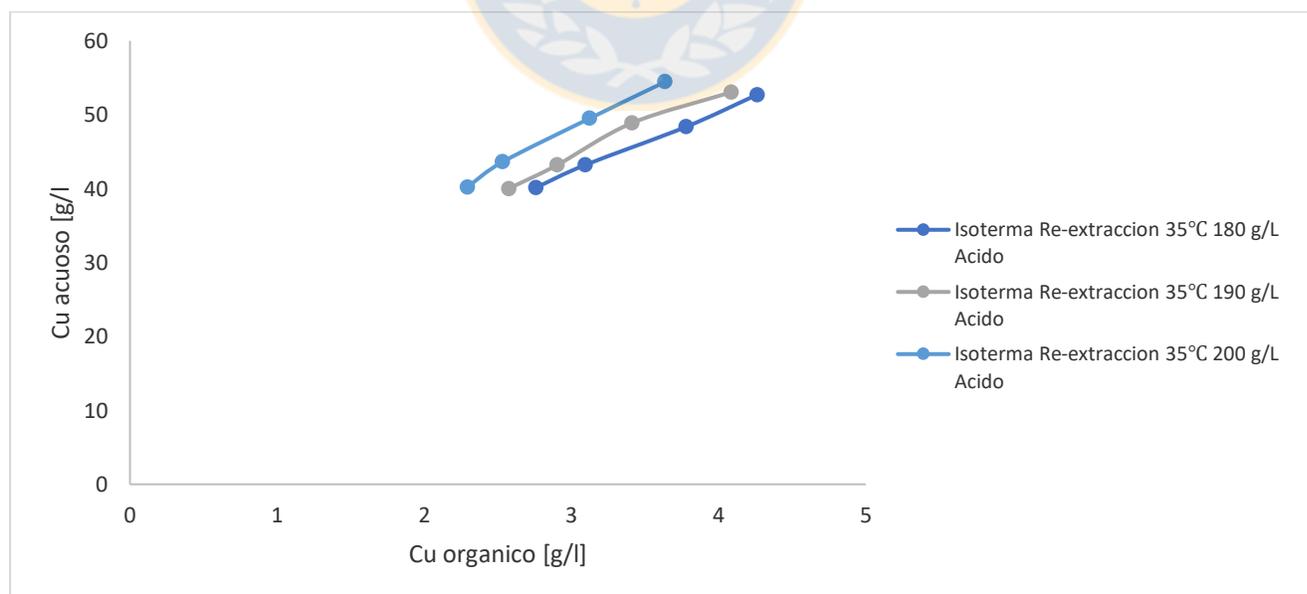


Figura 24: Isothermas de re-extracción a 35°C para Acorga M5910 26 %v/v cargado con 9.6 g/L de cobre. Electrolito 35 g/L de Cu^{2+} y ácido sulfúrico 180,190 y 200 g/L.

En ambas figuras se aprecia que las isoterma que fueron contactadas con una solución acida de mayor concentración de H_2SO_4 tuvieron una mejor re-extracción de cobre. Nuevamente utilizamos la razón 1:1 para poder comparar la re-extracción, donde se obtuvo que a 180 g/L de H_2SO_4 la re-extracción fue de un 69.79% mientras que a 200 g/L de H_2SO_4 fue 76.59%.

8.3 Separación de fases

Las experiencias realizadas para el estudio de separación de fases de extracción se llevaron a cabo en forma discontinua (batch) y en continuidad orgánica, midiendo la variación de la altura de la fase acuosa en el tiempo transcurrido desde que se suspende la agitación, mediante el programa Labview.

8.3.1 Propiedades físicas de las fases.

A continuación, en las tablas 7-9 se presentan los datos obtenidos de las propiedades físicas de fases acuosas y orgánicas.

Tabla 7: Densidad y viscosidad de soluciones acuosas iniciales.

Soluciones Iniciales	Temperatura medición [°C]	Densidad [g/cm ³]	Viscosidad [mPa s]
0 g/L Cl agua destilada	25	1,031	1,15
0 g/L Cl agua destilada	35	1,027	1,02
60 g/L Cl agua destilada	25	1,094	1,27
60 g/L Cl agua destilada	35	1,090	1,08
60 g/L Cl agua de mar	25	1,096	1,32
60 g/L Cl agua de mar	35	1,092	1,13

Tabla 8: Densidad y viscosidad de soluciones acuosas después del contacto.

Soluciones Post Contacto	Temperatura medición [°C]	Densidad [g/cm ³]	Viscosidad [mPa s]
0 g/L Cl agua destilada 25°C	25	1,022	1,13
0 g/L Cl agua destilada 35°C	35	1,021	0,98
60 g/L Cl agua destilada 25°C	25	1,073	1,23
60 g/L Cl agua destilada 35°C	35	1,071	1,06
60 g/L Cl agua de mar 25°C	25	1,088	1,24
60 g/L Cl agua de mar 35°C	35	1,087	1,09

Tabla 9: Densidad y viscosidad de soluciones orgánicas.

Soluciones Orgánicas	Densidad[g/cm ³]	Viscosidad [mPa s]	Temperatura medición [°C]
Orgánico Nuevo	0,819	3,19	25
Orgánico Nuevo	0,809	2,35	35
0 g/L Cl agua destilada	0,856	4,54	25
0 g/L Cl agua destilada	0,851	3,6	35
60 g/L Cl agua destilada	0,856	4,53	25
60 g/L Cl agua destilada	0,851	3,61	35
60 g/L Cl agua de mar	0,856	4,55	25
60 g/L Cl agua de mar	0,851	3,65	35

8.3.2 Efecto de la concentración de cloruro en la separación de fases.

A continuación de la figura 25 a 27 se muestran las comparaciones de separación de fases en extracción a distintas concentraciones de cloruro preparadas con agua de mar o agua destilada a temperaturas de 25 y 35°C.

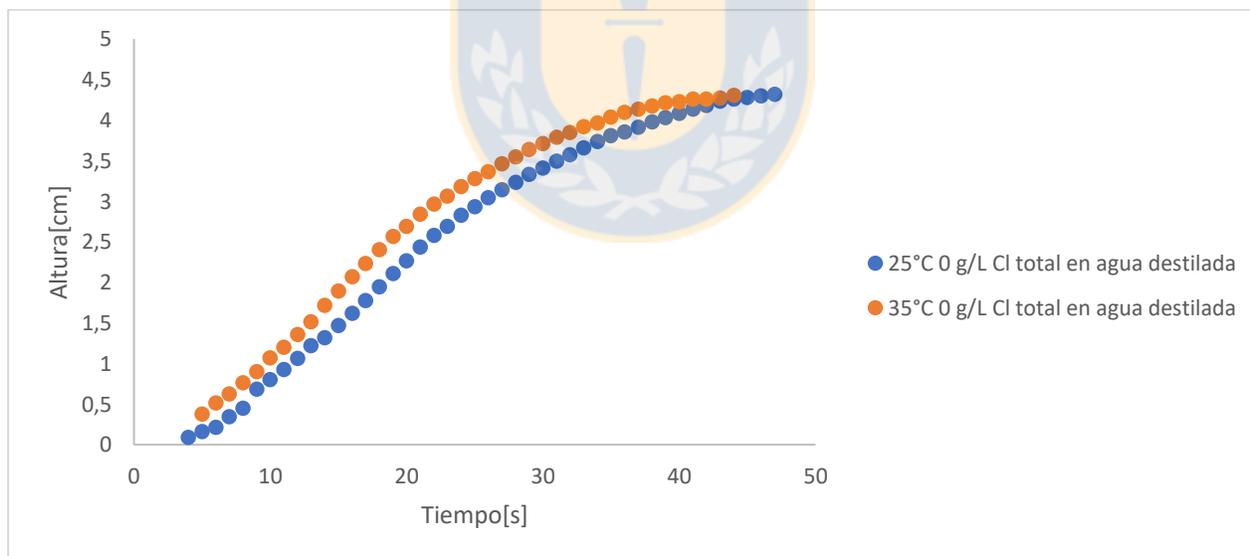


Figura 25: Posición de la interfase acuoso/dispersión en función del tiempo. Prueba en agua destilada con 0 g/L de Cl⁻ total.

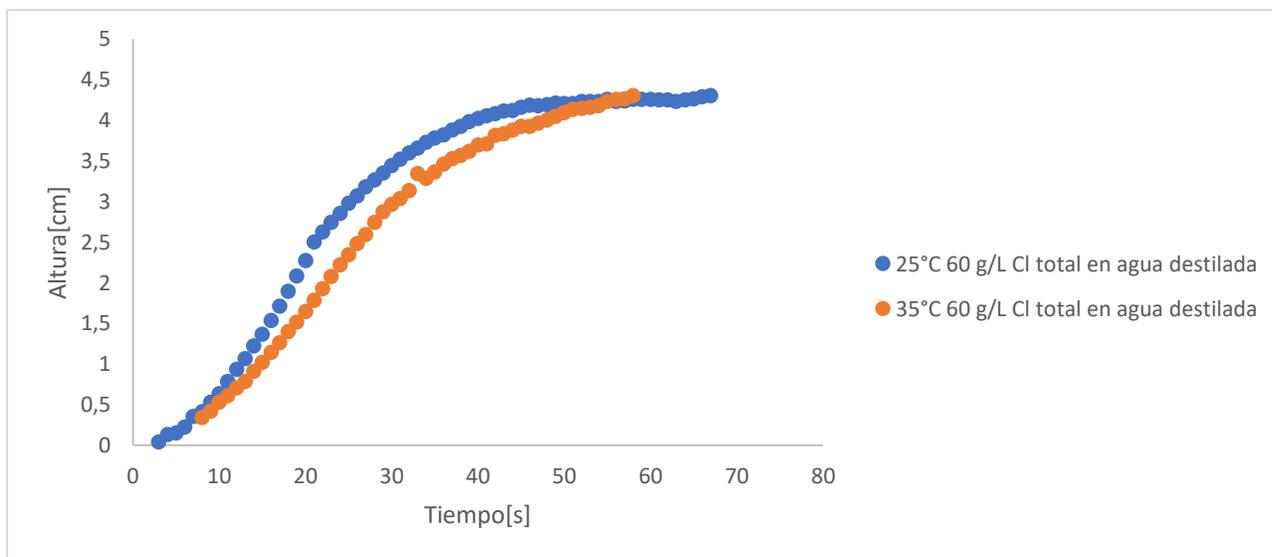


Figura 26: Posición de la interfase acuoso/dispersión en función del tiempo. Prueba en agua destilada con 60 g/L de Cl⁻ total.

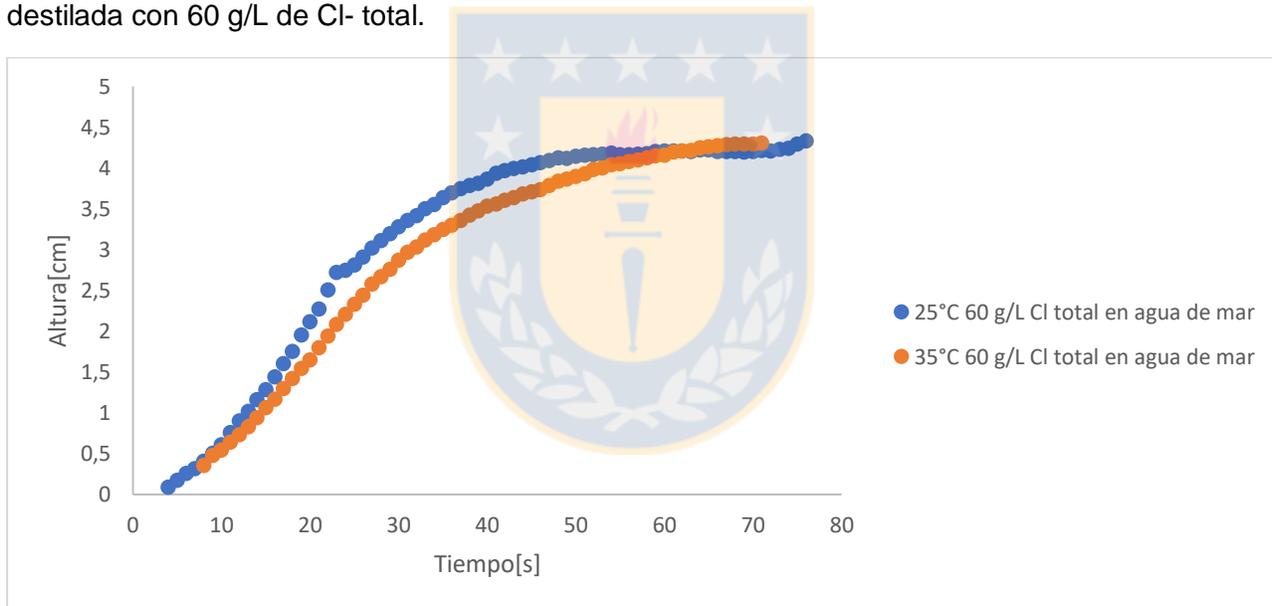


Figura 27: Posición de la interfase acuoso/dispersión en función del tiempo. Prueba en agua de mar con 60 g/L de Cl⁻ total.

Los tiempos de separación de fases, determinados de las curvas de posición de la interfase acuoso/dispersión se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Tiempos de Separación de fases.

Solución acuosa	Tiempo de separación de fases [s]	Temperatura [°C]
0 g/L Cl agua destilada	47	25
0 g/L Cl agua destilada	44	35
60 g/L Cl agua destilada	67	25
60 g/L Cl agua destilada	58	35
60 g/L Cl agua de mar	76	25
60 g/L Cl agua de mar	71	35

Se puede apreciar de las figuras y tabla presentadas que a que a medida que se aumentó la concentración de cloruro en las soluciones acuosas, el tiempo de separación de fases aumentó. Esto puede explicarse por la diferencia en los cambios de densidad y viscosidad, que produce el cloruro al existir en la fase acuosa, donde a medida que se eleva la concentración de cloruro la densidad y viscosidad aumentan como se distingue en las tablas 7 y 8.

8.3.3 Efecto de la temperatura en la separación de fases.

De las figuras 25-27 y tabla 10 se logra percibir que el incremento de temperatura tiene un efecto positivo en el tiempo de separación de fases.

8.4 Lavado orgánico

De los resultados obtenidos en las pruebas de lavado de orgánico presentados en la tabla 11, se puede observar que el reactivo Acorga M5910 cargó una cantidad aproximadamente del orden de los 100 mg/L de Cl⁻ en ambas razones O/A, para las dos concentraciones de interés.

Tabla 11: Pruebas lavado de orgánico

Soluciones Acuosas	Razón O/A	[mg/L] Cl ⁻
60 g/L Cl agua destilada	1/1	133
60 g/L Cl agua destilada	1/2	56,4
110 g/L Cl agua destilada	1/1	124
110 g/L Cl agua destilada	1/2	117

9. Conclusiones

En las isotermas de extracción utilizando Acorga M5910 se estudió la influencia de la temperatura e influencia del ion cloruro en su comportamiento. Para el primer caso se concluyó que la temperatura afectó de manera positiva la extracción de cobre, para ello se utilizó como referencia la razón O/A 1:1 de la isoterma con agua de mar con 60 g/L de Cl^- total, donde se obtuvo que a 25°C el porcentaje de extracción fue de un 91.56% mientras que a 35°C se obtuvo 92.15%.

De la influencia del ion cloruro se pudo concluir que afecta negativamente la extracción de cobre a medida que se aumentó su concentración. Para cuantificar el efecto se utilizó como referencia la razón O/A 1:1, donde se obtuvo que la isoterma con agua destilada con 0 g/L de Cl^- total a 25°C extrae un 96.11%, mientras que la isoterma con 110 g/L de Cl^- total en agua de mar a la misma temperatura extrae un 86.69%, una variación bastante considerable de aproximadamente un 10% entre la menor y mayor concentración de cloruro.

Por lo antes mencionado, podemos decir, que el extractante Acorga M5910 tiene una mejor eficiencia de extracción en medio cloruro a medida que aumenta la temperatura y una menor extracción de cobre a medida que aumenta la concentración de ion cloruro.

En cuanto a las pruebas de re-extracción, el equilibrio se vio perjudicado al aumentar la temperatura, descargando menos a 35°C de lo que se obtiene a 25°C, además un aumento en la concentración de ácido sulfúrico en la solución spent, mejora la eficiencia de re-extracción. Para la razón O/A 1:1 a 180 g/L de H_2SO_4 la re-extracción fue de un 69.79% mientras que a 200 g/L fue 76.59%.

Podemos concluir de lo anterior, que el extractante utilizado tiene mejores resultados en re-extracción de cobre a medida que disminuye la temperatura y a medida que aumenta la concentración de ácido en el electrolito spent.

Resultado de los análisis anteriores se pudo comprobar la alta selectividad por el cobre del extractante utilizado, donde se obtuvo que a 25°C razón O/A 1:1 este se cargó con 1168 ppm de Cu mientras que de Fe fueron 1.6 ppm, en el caso de una solución acuosa 0 g/L de Cl^- .

En la separación de fases se evaluó nuevamente como las variables temperatura y concentración ion cloruro afectaban al proceso. Del estudio se concluyó que a medida que se aumentó la temperatura de operación, los tiempos de separación de fase disminuyeron, esto se pudo apreciar en la solución 60 g/L Cl⁻ total en agua de mar donde a 25°C el tiempo de separación fue 67s mientras que a 35°C fue 58 s.

Al aumentar la concentración de ion cloruro en las soluciones, los tiempos de separación de fases aumentaron progresivamente. Para la solución de agua destilada sin cloruro agregado se obtuvo 47s de separación de fases y en el caso de la solución de agua de mar con 60 g/L de Cl⁻ total se obtuvo 76s.



10. Bibliografía

- Alguacil, F., Cobo, A., & Alonso, M. (2002). Copper separation from nitrate/nitric acid media using Acorga M5640 extractant. Part I: Solvent extraction study. *Chemical Engineering Journal*, 259-263.
- Castillo, J. (2012). Separación de fases en un sistema líquido/líquido para extracción por solventes de cobre. Tesis doctoral, Santiago de Chile.
- Chmielewski, T., Ochromowicz, K. (2013). Solvent extraction of copper (II) from concentrated leach liquors. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(1), 357-367.
- Cognis. (2007). Operación de plantas de extracción por solventes para cobre. Manual de operaciones, Santiago de Chile.
- Jeelani.S., Panoussopoulos K., Hartland S. (1999). Effect of Turbulence on the Separation of Liquid-Liquid Dispersions in Batch Settlers of Different Geometries. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 38 (2), 493-501.
- Kordosky, G., Virnig, M., & Boley, B. (2006). Equilibrium copper strip points as a function of temperature and other operating parameters: Implications for commercial copper solvent extraction plants. *Tsinghua Science and Technology*, 160-164.
- Navarro, D., Jara M., S., & Castillo S., J. (2013). Problemas en la separación de fases en extracción por solvente de cobre. *Remetalica* nº 19 , 6-10.
- Ruiz, M. C. (2013). Tecnología de purificación de soluciones: Extracción por solventes. Concepción: Universidad de Concepción.
- Ruiz, M. C., Risso J., Sanchez R. and Padilla R. (2018) Effect of chloride ions on the copper extraction using LIX 984N and Acorga M5910 In: Lambotte G. et al. (eds.), *Materials Processing Fundamentals, The Minerals, Metals & Materials Series*, TMS 2018: Materials Processing Fundamentals, 181-188.

11. Anexos

10.1 Masa de reactivos

Tabla 12: Masa de reactivos usada en la preparación de PLS

Compuesto	Peso Molecular	Masa para 1 L de PLS
$\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$	249,686	23,575
$\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	278,016	24,891
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	399,882	7,16

Tabla 13: Masa de sal a distintas concentraciones agregadas al PLS.

Compuesto	Peso molecular	60 g/L	110 g/L
NaCl	58,443	98,908	181,331

10.2 Pruebas isotermas de Extracción

Tabla 14: Datos Figura 12: Isotherma Agua destilada 25°C.

Razón	Acuoso Cu [g/L]	Orgánico Cu [g/L]
5/1	0,04526	1,24259
3/1	0,06495	2,06442
2/1	0,1032	3,077505
1/1	0,24339	6,01482
½	0,97049	10,57544
¼	2,7034	14,21924
1/6	3,56607	16,15284

Tabla 15:Datos Figura 12: Isoterma Agua destilada 35°C.

Razón	Acuoso Cu [g/L]	Orgánico Cu [g/L]
5/1	0,03395	1,244852
3/1	0,05164	2,068856667
2/1	0,08316	3,087525
1/1	0,21028	6,04793
½	0,90581	10,7048
¼	2,67206	14,3446
1/6	3,5851	16,03866

Tabla 16 Datos Figura 13: Isoterma Agua de mar 19,6 g/L Cl 25°C.

Razón O/A	Acuoso Cu [g/L]	Orgánico Cu [g/L]
5/1	0,048	1,240778
3/1	0,08448	2,055803333
2/1	0,13798	3,056955
1/1	0,29873	5,95316
½	1,09568	10,31242
¼	2,86787	13,53608
1/6	3,60708	15,86886

Tabla 17:Datos Figura 13: Isoterma Agua de mar 19,6 g/L Cl 35°C.

Razón O/A	Acuso Cu [g/L]	Orgánico Cu [g/L]
5/1	0,03283	1,243812
3/1	0,06887	2,061006667
2/1	0,12403	3,06393
1/1	0,29873	5,95316
½	1,04987	10,40404
¼	2,800097	13,807172
1/6	3,62213	15,77856

Tabla 18:Datos Figura 14: Isotherma Agua de mar 60 g/L Cl 25°C.

Razón O/A	Acuso Cu [g/L]	Orgánico Cu [g/L]
5/1	0,0790179	1,22910201
3/1	0,1340504	2,030159183
2/1	0,2061647	3,009181625
1/1	0,5242892	5,615179491
½	1,3754994	9,527938581
¼	2,9254578	12,85604356
1/6	3,633681	15,03472614

Tabla 19:Datos Figura 15: Isotherma Agua de mar 110 g/L Cl 35°C.

Razón O/A	Acuso Cu [g/L]	Orgánico Cu [g/L]
5/1	0,151610542	1,168349618
3/1	0,239527006	1,917943876
2/1	0,404936624	2,794211005
1/1	0,797741422	5,195617212
½	1,684379065	8,617959137
¼	2,984186671	12,03668785
1/6	3,728887919	13,58682429

Tabla 20:Datos Figura 15: Isotherma Agua de mar 110 g/L Cl 35°C.

Razón O/A	Acuso Cu [g/L]	Orgánico Cu [g/L]
5/1	0,137675133	1,1711367
3/1	0,204502196	1,929618813
2/1	0,396740684	2,798308975
1/1	0,734012846	5,259345788
½	1,625482253	8,735752761
¼	2,952871673	12,16194784
1/6	3,692515146	13,80506093

10.3 Pruebas Isotermas Re-extracción.

Tabla 21: Datos Figura 20: Isoterma Re-extracción 180 g/L H₂SO₄ a 25°C.

Razón O/A	Orgánico Cu [g/L]	Acuoso Cu [g/L]
3/1	3,689551712	54,44851097
2/1	3,34218916	49,22752463
1/1	2,772183763	43,53445603
½	2,321301248	40,34335759

Tabla 22:: Datos Figura 20: Isoterma Re-extracción 180 g/L H₂SO₄ a 35°C.

Razón O/A	Orgánico Cu [g/L]	Acuoso Cu [g/L]
3/1	4,26367233	52,72614912
2/1	3,777519199	48,35686455
1/1	3,094474153	43,21216564
½	2,757019826	40,1254983

Tabla 23: Datos Figura 21: Isoterma Re-extracción 190 g/L H₂SO₄ a 25°C.

Razón O/A	Orgánico Cu [g/L]	Acuoso Cu [g/L]
3/1	3,606708867	54,4808376
2/1	3,01799567	49,6597097
1/1	2,486694931	43,60374295
½	2,222942175	40,17633522

Tabla 24: Datos Figura 21: Isoterma Re-extracción 190 g/L H₂SO₄ a 35°C.

Razón O/A	Orgánico Cu [g/L]	Acuoso Cu [g/L]
3/1	4,08469251	53,04688667
2/1	3,410276005	48,87514903
1/1	2,902024668	43,18841322
½	2,572441016	40,0015858

Tabla 25: Datos Figura 22: Isotherma Re-extracción 200 g/L H₂SO₄ a 25°C.

Razón O/A	Orgánico Cu [g/L]	Acuoso Cu [g/L]
3/1	3,21656051	55,7096552
2/1	2,84367671	50,0667201
1/1	2,24888592	43,8999245
½	1,9726964	40,3598306

Tabla 26: Datos Figura 22 Isotherma Re-extracción 200 g/L H₂SO₄ a 35°C.

Razón O/A	Orgánico Cu [g/L]	Acuoso Cu [g/L]
3/1	3,63593455	54,4515331
2/1	3,12370763	49,5066583
1/1	2,53195102	43,6168594
½	2,29108946	40,2006341

Acidez en las soluciones en el equilibrio.

Tabla 27: Datos Figura 18 y 19: Valores de pH post contacto.

Razón O/A	25°C Destilada 0g/L Cl ⁻	35°C Destilada 0 g/L Cl ⁻	25°C Agua de Mar 18.8 g/L Cl ⁻	35°C Agua de Mar 18.8 g/L Cl ⁻
5/1	1,1	1,078	0,93	0,923
3/1	1,074	1,074	0,922	0,907
2/1	1,112	1,09	0,92	0,869
1/1	1,121	1,102	0,925	0,912
½	1,025	1,047	0,817	0,876
¼	1,238	1,285	1,07	1,111
1/6	1,109	1,195	1,126	1,3

Tabla 28: Datos Figura 18 y 19: Valores de pH post contacto.

Razón O/A	25°C Agua de Mar 60 g/L Cl ⁻	35°C Agua de Mar 60 g/L Cl ⁻	25°C Agua de Mar 110 g/L Cl ⁻	35°C Agua de Mar 110 g/L Cl ⁻
5/1	0,959	0,875	0,611	0,451
3/1	0,876	0,874	0,464	0,46
2/1	0,915	1,053	0,68	0,561
1/1	0,972	0,886	0,782	0,632
1/2	0,917	0,938	0,745	0,744
1/4	1,164	1,151	0,902	1
1/6	1,335	1,335	1,113	1,195



10.4 Pruebas Separación de Fases

Tabla 29: Datos Separación de fases agua destilada 0 g/L Cl total a 25°C.

t (s)	H (cm)		
47	4,31172727	19	2,09918182
46	4,29218182	18	1,93793182
45	4,27459091	17	1,76690909
44	4,25113636	16	1,61347727
43	4,22475	15	1,46004545
42	4,17295455	14	1,3115
41	4,128	13	1,21377273
40	4,07327273	12	1,05838636
39	4,0205	11	0,91961364
38	3,97163636	10	0,79745455
37	3,90420455	9	0,67822727
36	3,84654545	8	0,43977273
35	3,80354545	7	0,33715909
34	3,73122727	6	0,21011364
33	3,64815909	5	0,15440909
32	3,56802273	4	0,08404545
31	3,48788636	3	0,04397727
30	3,40090909	2	0,02247727
29	3,32370455	1	0,00195455
28	3,22695455	0	0
27	3,13215909		
26	3,03931818		
25	2,92595455		
24	2,81943182		
23	2,68456818		
22	2,57022727		
21	2,4295		
20	2,25652273		

Tabla 30: Datos Separación de fases agua destilada 0g/L Cl total a 35°C.

t (s)	H (cm)		
44	4,29902273	14	1,71022727
43	4,26775	13	1,505
42	4,25504545	12	1,35059091
41	4,25113636	11	1,19618182
40	4,21986364	10	1,06425
39	4,20618182	9	0,89322727
38	4,16806818	8	0,75836364
37	4,12506818	7	0,61763636
36	4,08890909	6	0,50818182
35	4,02831818	5	0,36843182
34	3,96088636	4	0,24627273
33	3,913	3	0,18177273
32	3,84263636	2	0,10065909
31	3,78302273	1	0,02540909
30	3,70484091		
29	3,62959091		
28	3,53772727		
27	3,45172727		
26	3,35888636		
25	3,27288636		
24	3,17222727		
23	3,05690909		
22	2,96015909		
21	2,83213636		
20	2,68359091		
19	2,56240909		
18	2,39529545		
17	2,22329545		
16	2,06009091		
15	1,88711364		

Tabla 31: Datos Separación de fases agua destilada 60g/L Cl total a 25°C.

t (s)	H (cm)	37	3,879	6	0,222
67	4,302	36	3,822	5	0,149
66	4,294	35	3,781	4	0,135
65	4,266	34	3,727	3	0,038
64	4,253	33	3,658	2	0,403
63	4,23	32	3,597	1	0,468
62	4,251	31	3,521	0	0,454
61	4,254	30	3,444		
60	4,261	29	3,354		
59	4,261	28	3,265		
58	4,262	27	3,184		
57	4,24	26	3,072		
56	4,232	25	2,978		
55	4,256	24	2,852		
54	4,231	23	2,745		
53	4,236	22	2,624		
52	4,236	21	2,503		
51	4,204	20	2,276		
50	4,207	19	2,082		
49	4,214	18	1,895		
48	4,191	17	1,714		
47	4,179	16	1,535		
46	4,189	15	1,365		
45	4,159	14	1,223		
44	4,125	13	1,064		
43	4,117	12	0,933		
42	4,083	11	0,786		
41	4,054	10	0,635		
40	4,021	9	0,529		
39	3,984	8	0,413		
38	3,925	7	0,355		

Tabla 32: Datos Separación de fases agua destilada 60g/L Cl total a 35°C.

t (s)	H (cm)	27	2,591
58	4,302	26	2,484
57	4,266	25	2,348
56	4,257	24	2,22
55	4,231	23	2,079
54	4,18	22	1,931
53	4,159	21	1,786
52	4,151	20	1,645
51	4,137	19	1,516
50	4,095	18	1,4
49	4,049	17	1,262
48	4,004	16	1,145
47	3,967	15	1,021
46	3,923	14	0,91
45	3,924	13	0,787
44	3,879	12	0,705
43	3,837	11	0,611
42	3,813	10	0,529
41	3,71	9	0,418
40	3,695	8	0,338
39	3,622	7	0,404
38	3,564	6	0,420
37	3,527	5	0,393
36	3,465	4	0,407
35	3,364	3	0,428
34	3,284	2	0,630
33	3,347	1	0,737
32	3,137	0	0,740
31	3,035		
30	2,966		
29	2,874		

Tabla 33: Datos Separación de fases agua de mar 60 g/L Cl total a 25°C.

t (s)	H (cm)	56	4,162	35	3,632	14	1,157
76	4,328	55	4,156	34	3,55	13	1,013
75	4,292	54	4,177	33	3,496	12	0,898
74	4,239	53	4,168	32	3,414	11	0,752
73	4,227	52	4,16	31	3,354	10	0,603
72	4,206	51	4,15	30	3,275	9	0,498
71	4,21	50	4,142	29	3,188	8	0,399
70	4,195	49	4,115	28	3,106	7	0,312
69	4,193	48	4,118	27	3,015	6	0,255
68	4,2	47	4,087	26	2,902	5	0,169
67	4,201	46	4,062	25	2,805	4	0,081
66	4,199	45	4,034	24	2,742	3	0,325
65	4,216	44	4,007	23	2,715	2	0,302
64	4,22	43	3,987	22	2,501	1	0,339
63	4,201	42	3,965	21	2,266	0	0,340
62	4,207	41	3,93	20	2,114		
61	4,204	40	3,863	19	1,948		
60	4,205	39	3,81	18	1,747		
59	4,201	38	3,783	17	1,601		
58	4,17	37	3,74	16	1,433		
57	4,166	36	3,689	15	1,279		

Tabla 34: Datos Separación de fases agua de mar 60 g/L Cl total a 35°C.

t (s)	H (cm)	45	3,706	18	1,416
71	4,3	44	3,681	17	1,291
70	4,287	43	3,632	16	1,165
69	4,287	42	3,603	15	1,056
68	4,287	41	3,556	14	0,935
67	4,28	40	3,526	13	0,822
66	4,268	39	3,469	12	0,724
65	4,256	38	3,42	11	0,635
64	4,241	37	3,352	10	0,538
63	4,214	36	3,297	9	0,472
62	4,205	35	3,244	8	0,349
61	4,193	34	3,177	7	0,442
60	4,152	33	3,11	6	0,409
59	4,144	32	3,026	5	0,383
58	4,117	31	2,964	4	0,508
57	4,094	30	2,864	3	0,462
56	4,077	29	2,758	2	0,646
55	4,047	28	2,662	1	0,737
54	4,033	27	2,573	0	0,739
53	3,994	26	2,434		
52	3,976	25	2,327		
51	3,928	24	2,2		
50	3,893	23	2,077		
49	3,861	22	1,936		
48	3,834	21	1,791		
47	3,779	20	1,646		
46	3,727	19	1,538		

10.5 Selectividad en la extracción de Hierro

Tabla 35: Extracción de hierro en agua destilada 0 g/L Cl total a 25°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
J 1	1/1	1,61	0,00161121
J 3	1/4	0,54	0,000535524
J 5	1/6	0,61	0,000608036

Tabla 36: Extracción de hierro agua en destilada 0 g/L Cl total a 35°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
J 2	1/1	2,30	0,002297354
J 4	1/4	0,62	0,000624442
J 6	1/6	0,65	0,000645536

Tabla 37: Extracción de hierro en agua de mar 19.6 g/L Cl total a 25°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
J 7	1/1	1,96	0,001955188
J 9	1/4	1,17	0,001167417
J 11	1/6	0,62	0,000620628

Tabla 38: Extracción de hierro en agua de mar 19.6 g/L Cl total a 35°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
J 8	1/1	4,01	0,004013701
J 10	1/4	0,92	0,000917489
J 12	1/6	0,83	0,000827338

Tabla 39: Extracción de hierro en agua de mar 60 g/L Cl total a 25°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
JS-48	1/1	2,70	0,002700189
JS-50	1/4	0,43	0,000426614
JS-52	1/6	0,82	0,000817729

Tabla 40: Extracción de hierro en agua de mar 60 g/L Cl total a 35°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
JS-49	1/1	2,78	0,00278058
JS-51	1/4	0,94	0,000935421
JS-53	1/6	1,35	0,001346614

Tabla 41: Extracción de hierro en agua de mar 110 g/L Cl total a 25°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
JS-70	1/1	1,87	0,001874759
JS-72	1/4	1,07	0,001066327
JS-74	1/6	1,36	0,001363265

Tabla 42: Extracción de hierro en agua de mar 110 g/L Cl total a 25°C.

Muestra	Razón	Fe [ppm]	Fe[g/L]
JS-71	1/1	2,60	0,0026
JS-73	1/4	1,29	0,001289825
JS-75	1/6	0,99	0,000989796

10.6 Caracterización

Tabla 43: Tensión superficial e interfacial soluciones.

Soluciones Cabeza	Tensión Superficial [Mn/m]
0 g/L Cl agua destilada	62
60 g/L Cl agua destilada	71
60 g/L Cl agua de mar	74

Tabla 44: Tensión superficial soluciones acuosas post contacto.

Soluciones Post Contacto	Tensión Superficial [mN/m]	Temperatura [°C]
0 g/L Cl agua destilada	68,3	25
0 g/L Cl agua destilada	68	35
60 g/L Cl agua destilada	51	25
60 g/L Cl agua destilada	5	35
60 g/L Cl agua de mar	48	25
60 g/L Cl agua de mar	45	35

Tabla 45: Tensión superficial soluciones orgánicas.

Soluciones Orgánicas	Tensión Superficial[mN/m]
Orgánico Nuevo	21,1
Orgánico Nuevo	21,1
0 g/L Cl agua destilada	20,6
0 g/L Cl agua destilada	20,7
60 g/L Cl agua destilada	20,7
60 g/L Cl agua destilada	20,7
60 g/L Cl agua de mar	20,8
60 g/L Cl agua de mar	20,8

Tabla 46: Tensiones interfaciales.

Tensiones
interfaciales [mN/m]

25°C	0 g/L	60 g/L Agua destilada	60 g/L Agua de mar
Interfacial	13,8	12,9	13
35°C	0 g/L	60 g/L Agua destilada	60 g/L Agua de mar
Interfacial	13,7	12,8	13

