

# Efecto de las impurezas en las propiedades físico-químicas de una solución de lixiviación de minerales de cobre

Effect of impurities in the physical-chemical properties of a copper mineral leaching solution

Efeito das impurezas nas propriedades físico-químicas de uma solução de lixiviação de minerais de cobre

Fecha de recepción: 23 de octubre de 2015  
Fecha de aprobación: 22 de diciembre de 2015

Patricio Navarro\*  
Cristian Vargas\*\*  
Carlos Ramírez\*\*\*

## Resumen

Se cuantificaron y analizaron las propiedades físicas y químicas de una solución de lixiviación de minerales de cobre con una elevada concentración de cloro, aluminio y magnesio. Las propiedades analizadas fueron densidad, viscosidad y oxígeno disuelto. También se evaluó el efecto de la viscosidad sobre el tiempo de separación de fases en extracción por solvente. Las concentraciones utilizadas de cloro fueron 20, 30 y 50 g/L; las de aluminio, 7, 15 y 23 g/L, y las de magnesio, de 6, 14 y 22 g/L. Las temperaturas ensayadas fueron 25, 35 y 45 °C. Los resultados obtenidos muestran que la presencia de impurezas produce un importante impacto en la viscosidad de la solución y solamente pequeños cambios en la densidad. El elemento que menos impacta en estas propiedades es el cloro, seguido del magnesio, y el que produjo mayor cambio fue el aluminio. El aumento de temperatura reduce el impacto de estos elementos. La presencia de impurezas disminuye la concentración de oxígeno disuelto. En extracción por solventes, un aumento en la viscosidad provoca tiempos más prolongados en la separación de fases.

**Palabras clave:** Hidrometalurgia, PLS, Producción de cobre, Lixiviación de cobre.

---

\* Ph.D. Universidad de Santiago de Chile (Santiago, Chile). patricio.navarro@usach.cl.  
\*\* Ph.D. Universidad de Santiago de Chile (Santiago, Chile). cristian.vargas@usach.cl.  
\*\*\* M.Sc. Universidad de Santiago de Chile (Santiago, Chile). carlos.ramirezal@usach.cl.

## Abstract

The physical and chemical properties of a copper leaching solution were quantified and analyzed in presence of high concentrations of chlorine, aluminum and magnesium. The properties tested were the density, viscosity and dissolved oxygen. The effect of the viscosity over time of phase separation in solvent extraction was also evaluated. The concentrations used of chlorine were 20, 30 and 50 g/L, aluminum 7, 15 and 23 g/L and finally the magnesium of 6, 14 and 22 g/L. The temperatures tested were 25, 35 and 45 °C. The results showed that the presence of impurities produces a significant impact on the viscosity and only small changes in density. Chlorine is the impurity with less impact, followed by magnesium, and aluminum producing the greatest impact. The temperature increase reduces the impact of these elements. The presence of impurities causes a decrease in dissolved oxygen concentration. In solvent extraction, an increase in viscosity produces longer times of phase separation.

**Keywords:** Copper production, Copper leaching, Hydrometallurgy, PLS.

## Resumo

Foram quantificadas e analisadas as propriedades físicas e químicas de uma solução de lixiviação de minerais de cobre com uma elevada concentração de cloro, alumínio e magnésio. As propriedades analisadas foram densidade, viscosidade e oxigênio dissolvido. Também avaliou-se o efeito da viscosidade sobre o tempo de separação de fases em extração por solvente. As concentrações utilizadas de cloro foram 20, 30 e 50 g/L; as de alumínio, 7, 15 e 23 g/L, e as de magnésio, de 6, 14 e 22 g/L. As temperaturas ensaiadas foram 25, 35 e 45 °C. Os resultados obtidos mostram que a presença de impurezas produz um importante impacto na viscosidade da solução e somente pequenas mudanças na densidade. O elemento que menos impacta nestas propriedades é o cloro, seguido do magnésio, e o que produziu maior mudança foi o alumínio. O aumento de temperatura reduz o impacto destes elementos. A presença de impurezas diminui a concentração de oxigênio dissolvido. Em extração por solventes, um aumento na viscosidade provoca tempos mais prolongados na separação de fases.

**Palavras chave:** Hidrometalurgia, PLS, Produção de cobre, Lixiviação de cobre.

Cómo citar este artículo:

[1] P. Navarro, C. Vargas & C. Ramírez, "Efecto de las impurezas en las propiedades físicoquímicas de una solución de lixiviación de minerales de cobre", *Fac. Ing.*, vol. 25 (41), pp. 75-84, ene.-abr. 2016.

## I. INTRODUCCIÓN

Una de las vías de tratamiento para la producción de cobre es la hidrometalurgia, compuesta por las siguientes etapas: reducción de tamaño del mineral, lixiviación, extracción por solventes y electroobtención. El resultado final de estas etapas es la producción de cátodos de alta calidad con bajos costos de operación [1].

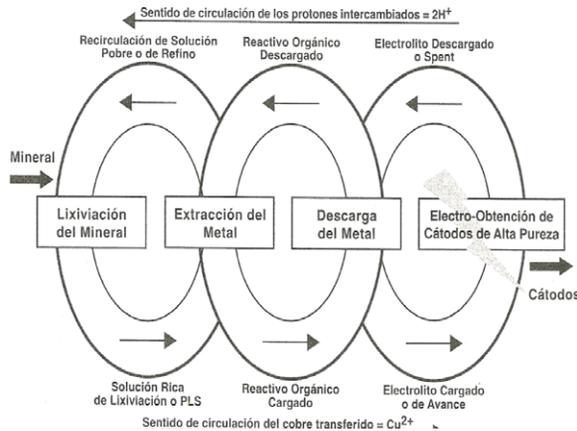


FIG. 1. Esquema proceso hidrometalúrgico LIX-SX-EO para el cobre [1]

La etapa de lixiviación permite obtener el cobre de los minerales que lo contienen aplicando una solución de ácido sulfúrico y agua; como resultado final de esta etapa se obtiene una solución llamada PLS (Pregnant Leach Solution), que contiene iones disueltos, entre ellos  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , etc. [2].

Los procesos hidrometalúrgicos conllevan un gran consumo de agua; si bien en la zona sur de Chile el recurso hídrico es mayor que el promedio mundial, en el norte de Chile es muy diferente e, incluso, menor que la media normal [3]. Estudios realizados por entidades internacionales indican que el recurso hídrico es cada vez más escaso; por tal razón, es necesario buscar soluciones a este problema y conocer los efectos que producen los iones y sales disueltas que tienen las aguas en las etapas de la producción vía hidrometalurgia [4].

De los antecedentes descritos se puede destacar que la presencia de iones disueltos en las aguas utilizadas en los procesos de lixiviación va en aumento. Por otra parte, estos iones les imparten propiedades diferentes a las aguas industriales, como densidad,

viscosidad y capacidad de disolver oxígeno. Estas nuevas propiedades de las fases acuosas pueden traer importantes cambios en los procesos de lixiviación, extracción por solvente y electroobtención de cobre [5].

El objetivo de este estudio es cuantificar y analizar el impacto en las propiedades físicas y químicas del PLS, emulando la utilización de agua de mar y salmueras típicas de la zona norte de Chile, que contienen una elevada concentración de sales presentes.

## II. PARTE EXPERIMENTAL

Previo a la realización de las pruebas y mediciones de laboratorio, se establecieron los tipos de pruebas y parámetros por utilizar durante las experiencias; los parámetros fueron establecidos con base en recopilación bibliográfica.

### A. Elaboración de los PLS sintéticos

Primero, se preparó un PLS sintético a nivel de laboratorio, el cual fue llamado PLS Patrón (P), con las siguientes características: concentración de cobre de 4,5 [g/L] adicionado como sulfato cúprico penta-hidratado; concentración de hierro de 5,0 [g/L], adicionado como sulfato férrico hidratado y pH entre 1,6 y 1,8. Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico.

Una vez preparado el PLS Patrón (P), se procedió a agregar de manera controlada, de forma individual y en conjunto, los siguientes elementos: cloro, aluminio y magnesio. Las concentraciones de estos elementos son las típicas que se encuentran en agua de mar y salmueras, y fueron las siguientes:

Cloro (Cl) en concentraciones de 20, 35 y 50 [g/L], como Cloruro de Sodio.

Aluminio (Al) en concentraciones de 7, 15 y 23 [g/L], como Sulfato Aluminio 18- hidratado.

Magnesio (Mg) en concentraciones de 6, 14 y 22 [g/L], como Sulfato Magnesio 7-Hidratado.

En total se prepararon 49 PLS, cuyas características se muestran en la Tabla I. La unidad de concentración es [g/L].

**TABLA I**  
COMPOSICIÓN DE LOS PLS UTILIZADOS

PLS	Características	PLS	Características
1	Patrón (P) Cu [4,5] + Fe [5,0]	26	P + Al [15] + Mg [6]
2	P + Cl [20]	27	P + Al [15] + Mg [14]
3	P + Cl [35]	28	P + Al [15] + Mg [22]
4	P + Cl [50]	29	P + Al [23] + Mg [6]
5	P + Al [7]	30	P + Al [23] + Mg [14]
6	P + Al [15]	31	P + Al [23] + Mg [22]
7	P + Al [23]	32	P + Cl [20] + Al [7] + Mg [6]
8	P + Mg [6]	33	P + Cl [20] + Al [7] + Mg [14]
9	P + Mg [14]	34	P + Cl [20] + Al [7] + Mg [22]
10	P + Mg [22]	35	P + Cl [20] + Al [15] + Mg [6]
11	P + Cl [20] + Al [7]	36	P + Cl [20] + Al [15] + Mg [14]
12	P + Cl [20] + Al [15]	37	P + Cl [20] + Al [15] + Mg [22]
13	P + Cl [20] + Al [23]	38	P + Cl [20] + Al [23] + Mg [6]
14	P + Cl [50] + Al [7]	39	P + Cl [20] + Al [23] + Mg [14]
15	P + Cl [50] + Al [15]	40	P + Cl [20] + Al [23] + Mg [22]
16	P + Cl [50] + Al [23]	41	P + Cl [50] + Al [7] + Mg [6]
17	P + Cl [20] + Mg [6]	42	P + Cl [50] + Al [7] + Mg [14]
18	P + Cl [20] + Mg [14]	43	P + Cl [50] + Al [7] + Mg [22]
19	P + Cl [20] + Mg [22]	44	P + Cl [50] + Al [15] + Mg [6]
20	P + Cl [50] + Mg [6]	45	P + Cl [50] + Al [15] + Mg [14]
21	P + Cl [50] + Mg [14]	46	P + Cl [50] + Al [15] + Mg [22]
22	P + Cl [50] + Mg [22]	47	P + Cl [50] + Al [23] + Mg [6]
23	P + Al [7] + Mg [6]	48	P + Cl [50] + Al [23] + Mg [14]
24	P + Al [7] + Mg [14]	49	P + Cl [50] + Al [23] + Mg [22]
25	P + Al [7] + Mg [22]		

### B. Medición de propiedades

A continuación, se ajustaron los pH de las soluciones a valores entre 1,6 y 1,8, para realizar las mediciones de densidad, viscosidad y concentración de oxígeno disuelto a diferentes temperaturas: 25, 35 y 45 °C.

### C. Pruebas de separación de fases en extracción por solvente

La fase orgánica estuvo compuesta por el extractante LIX 984N y el diluyente SCAID 103. Se trabajó con una razón de fases O/A = 1, continuidad orgánica y 25 °C de temperatura. La concentración de extractante fue de 18% v/v. Se evaluó el tiempo de separación de fases usando diferentes tipos de PLS, bajo diferentes condiciones de temperatura. En la Fig. 2 se muestra un esquema de la metodología experimental utilizada.



**FIG. 2.** Esquema de la determinación experimental del tiempo de separación de fases.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en las mediciones experimentales de densidad, viscosidad, solubilidad de oxígeno disuelto y pruebas de extracción por solvente para los distintos PLS fueron los siguientes:

### A. Densidad

En las siguientes figuras se muestran los resultados de las mediciones de densidad a diferentes temperaturas y concentraciones de impurezas.

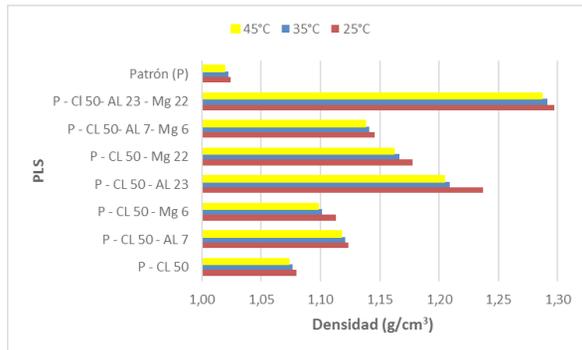


FIG. 3. Efecto combinado de Cl (Concentración fija) + Al + Mg en la densidad del PLS.

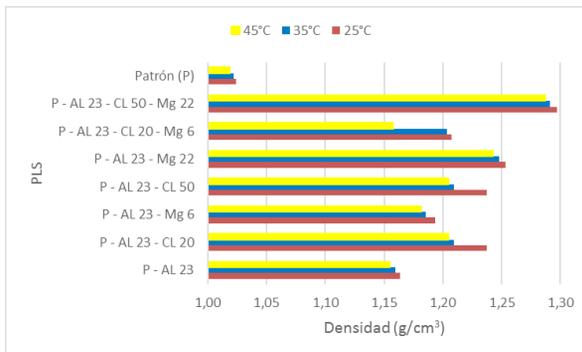


FIG. 4. Efecto combinado de Cl + Al (Concentración fija) + Mg en la densidad del PLS.

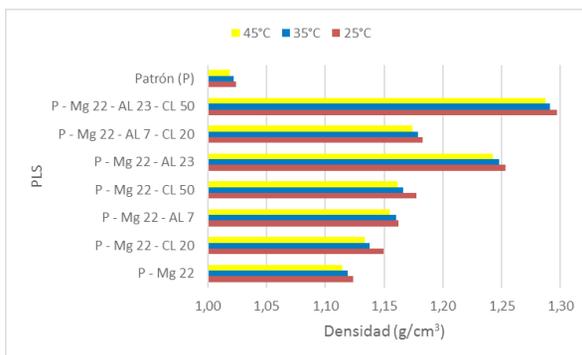


FIG. 5. Efecto combinado de Cl + Al + Mg (Concentración fija) en la densidad del PLS.

La presencia de aluminio y magnesio incorpora sulfato al PLS, mientras que el cloro incorpora sodio. A similares masas de aluminio, magnesio y cloro, el aluminio es el elemento que más masa adicional incorpora al PLS (sulfato), mientras que el cloro también adiciona masa extra (sodio), pero la masa de sodio adicionada es mucho menor en comparación con el sulfato que adicionan tanto el aluminio como el magnesio. Por lo tanto, dado que el aluminio es el elemento con más aporte másico (debido a un aporte mayor de sulfato), es el que más impacta en la densidad.

### B. Viscosidad

En las figuras siguientes se muestran los resultados de las mediciones de viscosidad a diferentes temperaturas y concentraciones de impurezas.

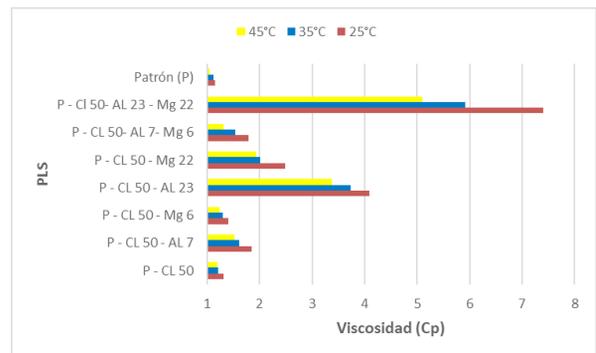


FIG. 6. Efecto combinado de Cl (Concentración fija) + Al + Mg en la viscosidad del PLS.

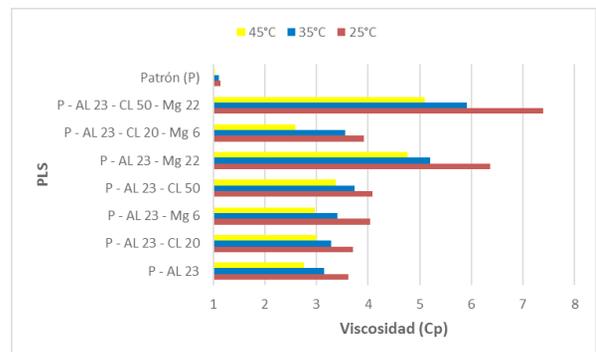


FIG. 7. Efecto combinado de Cl + Al (Concentración fija) + Mg en la viscosidad del PLS.

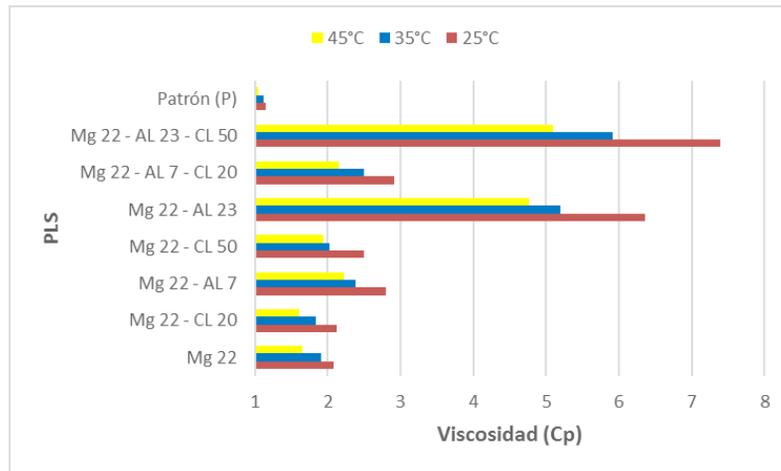


FIG. 8. Efecto combinado de Cl + Al + Mg (Concentración fija) en la viscosidad del PLS.

Para una concentración de 20 g/L de aluminio, magnesio y cloro se obtiene la información de la Tabla II.

**TABLA II**  
MOLES ADICIONADOS PARA UNA CONCENTRACIÓN DE 20 g/L

Elemento	Reactivo	Moles	Moles adicionales	Sumatoria de Moles
Aluminio	$Al_2(SO_4)_3$	$Al^{+3} = 0,74$	$SO_4^{-2} = 1,11$	1,85
Magnesio	$MgSO_4$	$Mg^{+2} = 0,82$	$SO_4^{-2} = 0,82$	1,65
Cloro	NaCl	$Cl = 0,56$	$Na^+ = 0,56$	1,12

La adición de aluminio, como sulfato de aluminio [ $Al_2(SO_4)_3$ ], aporta la mayor cantidad de moles totales en comparación con el magnesio, como sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ), y el cloro, como sal (NaCl); además de tener la mayor carga iónica, debido a la mayor cantidad de sulfato ( $SO_4^{-2}$ ) aportado en comparación con el aporte de sulfato dado por el magnesio. El cloro, como NaCl, es el elemento que incorpora la menor cantidad de moles totales, además que tiene la menor fuerza iónica. Por lo dicho, el aluminio es el que más impacta en la viscosidad del

PLS, seguido del magnesio y, en menor medida, del cloro.

### C. Oxígeno disuelto

La Fig. 9 presenta el impacto de cada uno de los elementos en estudio; se aprecia que, a 25 °C y variando la concentración de cada elemento, el oxígeno disuelto en el PLS va disminuyendo, y que el cloro es el elemento que menos impacta, seguido del magnesio y finalmente el aluminio.

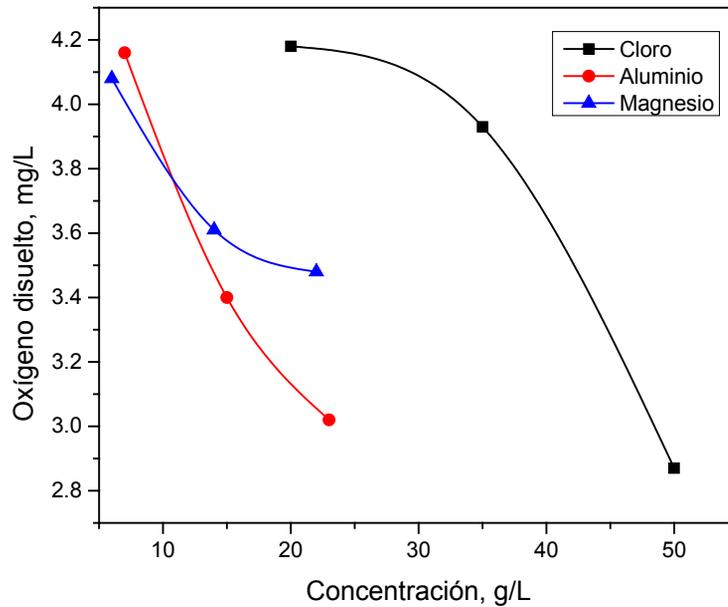


FIG. 9. Efecto del cloro, aluminio y magnesio en la concentración de oxígeno disuelto en el PLS a 25 °C.

A una misma concentración de cada elemento dentro de los rangos estudiados, el aluminio es el que más impacta, debido a que a medida que se adiciona

aluminio al PLS también se adiciona sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en una gran cantidad, esta condición se observa en Tabla III.

TABLA III

TABLA COMPARATIVA DE CONCENTRACIONES EN LA SOLUBILIDAD DE OXÍGENO EN PLS A 25 °C

Elemento	Conc. [g / L]	Elemento que adiciona	Conc. [g / L]	Conc. de oxígeno [mg/ L]
Cloro (Cl)	20	Sodio ( $\text{Na}^+$ )	12,97	4,20
Aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ )	20	Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	115,66	3,15
Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )	20	Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	85,58	3,50
PLS Patrón	-	-	-	5,07

La adición en conjunto de los elementos en estudio no presenta un impacto sinérgico ni aditivo, solo se observa, por medio de las Figs. 10 y 11, que entre mayor sea la carga iónica del PLS, menor es la

cantidad de oxígeno disuelto; al igual que en los casos anteriores, el aumento de la temperatura disminuye la concentración de oxígeno en el PLS.

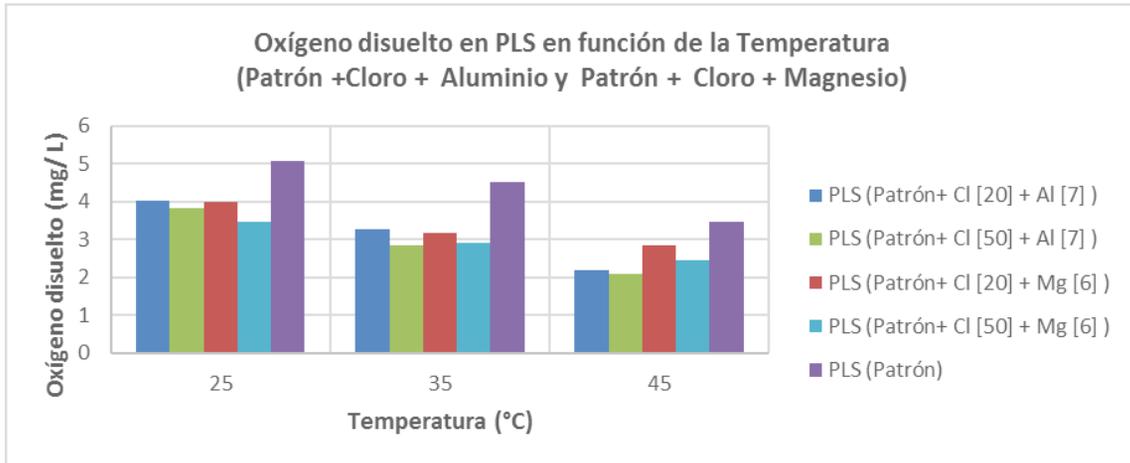


FIG. 10. Oxígeno disuelto en PLS en función de la temperatura, en presencia de dos elementos.

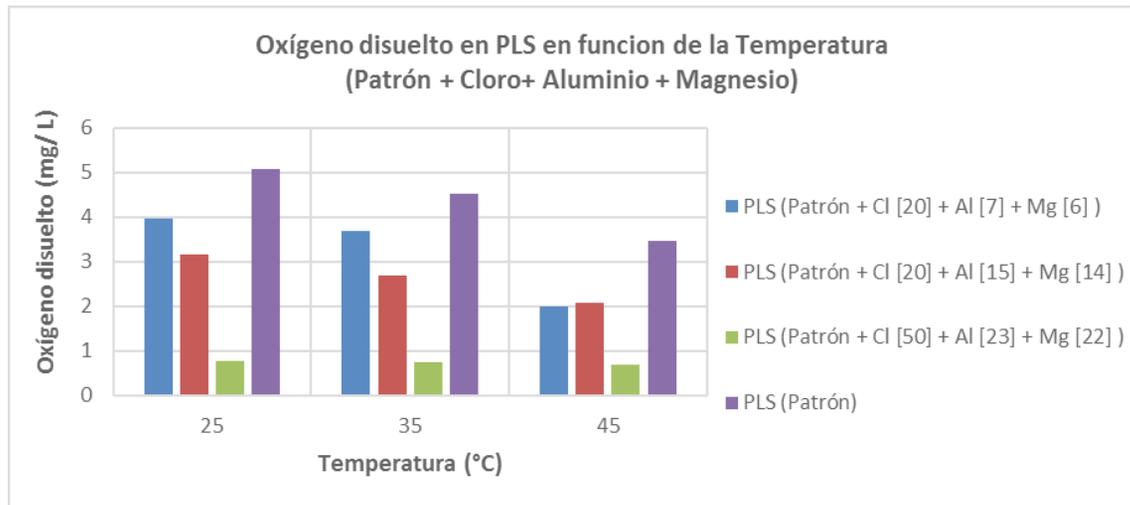


FIG. 11. Oxígeno disuelto en PLS en función de la temperatura, en presencia de todas las impurezas estudiadas.

#### D. Separación de fases en extracción por solvente

El tiempo de separación de fases es el que toman la fase acuosa y la orgánica en separarse una vez terminada la mezcla entre ambos. Algunos factores que influyen en

este tiempo son la viscosidad, la carga iónica del PLS, la concentración de extractante y el tamaño de gota del orgánico, entre otros. Los resultados de la Tabla IV muestran los tiempos de separación de fases de los distintos PLS, donde se aprecia que entre mayor sea la viscosidad del PLS, mayor es el tiempo de separación.

**TABLA IV**  
TIEMPOS DE SEPARACIÓN DE FASES

PLS	Viscosidad (Cp)	Tiempo (s)
PATRÓN (P)	1,146	4
P - Cl [20] - Al [7]	1,740	10
P - Cl [50] - Al [23]	4,090	27
P - Cl [20] - Mg [6]	1,318	6
P - Cl [50] - Mg [22]	2,492	15
P - Al [7] - Mg [6]	1,738	10
P - Al [23] - Mg [22]	6,363	38
P - Cl [20] - Al [7] - Mg [6]	1,930	11
P - Cl [50] - Al [23] - Mg [22]	7,398	44
P - Cl [50] - Al [7] - Mg [6]	1,787	10
P - Cl [20] - Al [23] - Mg [6]	3,926	24
P - Cl [20] - Al [7] - Mg [22]	2,912	18

En la Fig. 12 se muestra la relación entre la viscosidad del PLS y el tiempo de separación de fases; se observa que presenta un comportamiento cuya tendencia es lineal ( $R^2 = 0,9915$ ): a mayor viscosidad, mayor es el tiempo de separación de fases.

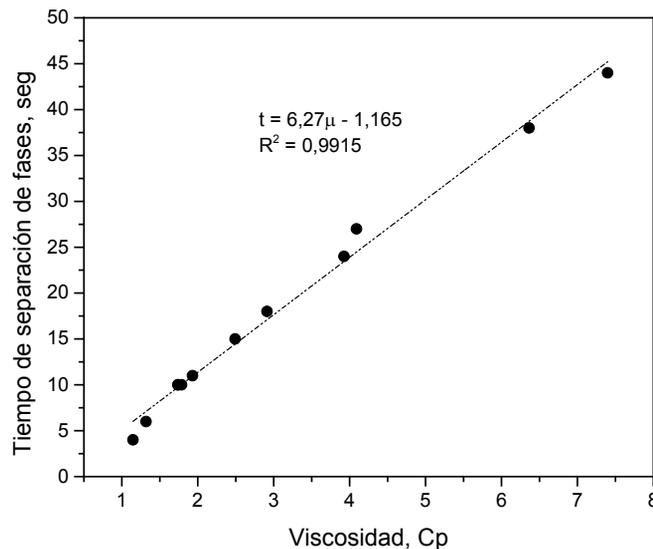


FIG. 12. Dependencia del tiempo de separación de fases con la viscosidad.

#### IV. CONCLUSIONES

La adición de cloro, aluminio y magnesio aumenta la densidad y la viscosidad del PLS.

El aluminio es el elemento que más impacta en la densidad y la viscosidad del PLS; para una concentración de 22 g/L, la densidad aumenta en 9,8% a 25 °C, y el aumento de viscosidad del PLS, en

comparación con la del PLS patrón, es de un 216% a 25 °C.

El aumento de temperatura desde 25 °C a 45 °C disminuye la densidad del PLS en todos los casos.

El aumento de temperatura desde 25 °C a 45 °C disminuye la viscosidad del PLS, pero esta disminución es diferente de acuerdo con el tipo de impureza; para cloro, la disminución es de un 9%, para el magnesio es de un 22% y para el aluminio es de un 20%.

La adición tanto individual como en conjunto de cloro, magnesio y aluminio disminuye la concentración de oxígeno disuelto en el PLS.

Existe una relación lineal entre el tiempo de separación de fases y la viscosidad del PLS.

### AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Santiago de Chile (DICYT), por el patrocinio otorgado a través del proyecto N°051414ND.

### REFERENCIAS

- [1] E. Domic, *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Chile: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2001.
- [2] G. Kordosky, "Copper recovery using leach/solvent extraction/electrowinning technology: Forty years of innovation, 2.2 million tonnes of copper annually", *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 102, pp. 445- 450, November/December 2002.
- [3] Comisión Chilena del Cobre, *Proyección de demanda de aguas frescas en la minería del cobre 2013-2021*", 2013.
- [4] Comisión Chilena del Cobre, *Best practices and efficient use of water in the mining industry*, 2008.
- [5] C. Ramírez, *Efecto de impurezas en las propiedades fisicoquímicas de un PLS*, Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil en Metalurgia, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, 2014.